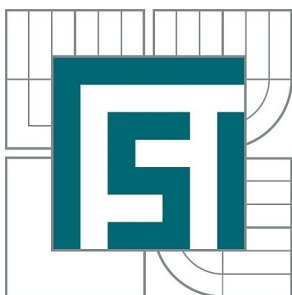


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

APLIKACE BEZDOZVUKOVÝCH KOMOR

ANECHOIC CHAMBER APPLICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN LASOTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ PROKOP

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Lasota

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aplikace bezdozvukových komor

v anglickém jazyce:

Anechoic Chamber Application

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na shromáždění informací o možnostech užití bezdozvukových komor.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je vypracování rešerše v oblasti aplikace bezdozvukových komor.

Práce musí obsahovat:

1. Současný přehled používaných způsobů měření akustických vlastností pomocí bezdozvukové komory.
2. Rozdělení jednotlivých způsobů měření dle zvolených kritérií.
3. Rámcový návrh metodiky měření akustického výkonu v plně bezdozvukové komoře.

Seznam odborné literatury:

- [1] MIŠUN, V. Vibrace a hluk. 1. vyd. Brno: FSI VUT v Brně a PC-DIR, s.r.o., 1998. 177s. ISBN 80-214-1262-3.
- [2] BIES, D. A., HANSEN, C.: Engineering noise control: theory and practice. 4th ed. London: Spon Press, 2009, 747 s. ISBN 0-203-87240-1
- [3] Elektronické zdroje: databáze Knovel, Science Direct, SpringerLink.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Prokop

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 4.11.2013



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan



ABSTRAKT

Tato práce pojednává o určování akustických veličin a možnostech užívání bezdozvukové komory. Pro tento účel jsou zde popsány fyzikální požadavky kladené na bezdozvukové komory. Podstatná část této práce je také věnována měření zvukového signálu z důvodu výpočtu hladiny akustického tlaku. Závěrečná část této práce obsahuje zvukové signály ze dvou pozic mikrofону pořízených během měření zdroje zvuku a jejich následné zpracování a vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdozvuková komora, měření akustického tlaku, analýza hluku, váhový filtr, volné pole

ABSTRACT

This bachelor's thesis presents evaluating of acoustic variables and anechoic chamber application. There are described physical requirements for the anechoic chambers. Part of this thesis deals with measurement of audio signals to calculation sound pressure level. The last part of this work includes audio signals of two microphone positions during the measurement sound source and finally their processing and evaluation.

KEYWORDS

Anechoic chamber, sound pressure measurements, noise control, weighting filter, free field



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LASOTA, M. *Aplikace bezdozvukových komor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Prokop.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Aleše Prokopa a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. května 2014

.....

Martin Lasota



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Alešovi Prokopovi za odbornou pomoc, konzultace, poskytnutí rad a připomínek při řešení této závěrečné práce.



OBSAH

Úvod.....	11
1 Hluk.....	12
1.1 Vznik hluku a vlnění.....	12
1.2 Rozdělení vlnění.....	12
1.2.1 Longitudinální vlnění.....	12
1.2.2 Transverzální vlnění.....	12
1.3 Rozdělení hluku.....	13
1.3.1 Mechanický hluk.....	13
1.3.2 Aerodynamický hluk.....	13
2 Úvod do akustických veličin a termínů.....	14
2.1 Akustický tlak.....	14
2.1.1 Hladina akustického tlaku.....	14
2.2 Kmitavé děje.....	14
2.2.1 Výchylka.....	14
2.2.2 Doba kmitu.....	15
2.2.3 Časové rozvinutí harmonického kmitání.....	15
2.2.4 Pohybová rychlost částice.....	15
2.2.5 Rozklad periodických kmitů.....	15
2.2.6 Rychlost šíření rozruchu prostředím.....	15
2.2.7 Vlnová délka.....	16
2.3 Akustický výkon.....	16
2.3.1 Hladina akustického výkonu.....	16
2.4 Akustická intenzita.....	16
2.5 Akustická impedance.....	16
2.6 Akustická energie.....	17
2.6.1 Hladina akustické energie.....	17
2.7 Index směrovosti.....	17
2.8 Spektra vibroakustických signálů.....	17
2.9 Oktávová frekvenční pásma.....	18
2.10 Sledovaný frekvenční rozsah.....	18
2.11 Volné zvukové pole.....	18
3 Bezdozvuková komora.....	19
3.1 Úvod.....	19
3.2 Historická perspektiva.....	20
3.3 Fyzikální požadavky na bezdozvukovou komoru.....	21



3.3.1	Požadavek na volné zvukového pole	21
3.3.2	Požadavek na vysoký činitel pohltivosti zvuku	22
3.3.3	Požadavek na vysoký stupeň vzduchové neprůzvučnosti.....	23
4	Rozšíření akustických veličin a termínů.....	25
4.1	Definice termínů	25
4.1.1	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku	25
4.1.2	Hladina časově integrovaného akustického tlaku jednotlivé zvukové události ..	25
4.1.3	Charakteristický rozměr zdroje	26
4.1.4	Hluk pozadí	26
4.1.5	Korekce na hluk pozadí.....	26
4.1.6	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše	26
4.1.7	Hladina časově integrovaného akustického tlaku jzu	26
4.1.8	Index nerovnoměrnosti hladiny měřených hladin akustického tlaku	26
4.2	Referenční meteorologické podmínky	27
4.3	Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie.....	27
4.3.1	Měření ve zkušební místnosti.....	27
4.3.2	Měření meteorologických podmínek	27
4.3.3	Podmínky prostředí a polohy mikrofonu	27
4.4	Určování hladin akustického výkonu zdroje hluku	28
4.4.1	Měření hladin akustického tlaku	28
4.4.2	Korekce na hluk pozadí.....	29
4.4.3	Výpočet hladin časově průměrovaného akustického tlaku	29
4.4.4	Výpočet hladin akustického výkonu.....	30
4.5	Určování hladin akustické energie zdroje vyzařujícího impulsní hluk.....	31
4.5.1	Měření hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU.....	32
4.5.2	Výpočet hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU na ploše	32
4.5.3	Výpočet hladin akustické energie	32
4.6	Výpočet indexů směrovosti	33
4.7	Výpočet indexu nerovnoměrnosti hladiny akustického tlaku na měřicí ploše	33
4.8	Hladina akustické energie a frekvenčně vážená hladina akustického výkonu	33
5	Nejistoty měření	34
5.1	Celková směrodatná odchylka σ_{tot}	34
5.2	Rozšířená nejistota měření	34
5.3	Směrodatná odchylka σ_{omc}	34
5.4	Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti σ_{R0}	35
6	Měřicí přístroje.....	37



6.1	Mikrofon	37
6.1.1	Typ mikrofonu	37
6.1.2	Směrová charakteristika	37
6.1.3	Frekvenční charakteristika	37
6.1.4	Použitý mikrofon během měření	37
6.2	Zvukoměr	38
6.2.1	Použitý zvukoměr během měření	39
6.3	Použitý kalibrátor	39
6.4	Použitý rekordér	39
7	Vlastní měření	40
7.1	Použitá bezdozvuková komora	40
7.2	Použitý zdroj zvuku	41
7.3	Postup při měření	42
7.4	Zpracování signálu v prostředí MATLAB	43
7.5	Výsledky měření	44
	Závěr	46
	Seznam použitých symbolů a zkratk	49
	Seznam obrázků	52
	Seznam tabulek	53
	Seznam příloh	54



ÚVOD

Bezdozvuková komora představuje akustickou laboratoř, ve které je možné změřit, otestovat a ověřit celou řadu technických produktů. Zejména v dnešním světě je každoroční snahou investorů snížit hlukový projev jejich výrobků. Z tohoto důvodu jsou bezdozvukové komory používány k provádění hlukových zkoušek. Dalším důvodem může být skutečnost, že nalezení vhodného zkušebního stanoviště na volném prostranství nebo ve stíněných komorách je velmi složité.

Cílem této práce je seznámení s možnostmi užívání těchto bezdozvukových komor. Práce je zaměřena především teoreticky, a to s důrazem na fyzikální veličiny vyskytující se v oblasti akustiky.

Dále se práce zabývá zpracováním naměřeného signálu v rámci vlastního měření a výsledné určení hladiny akustického tlaku za pomoci programovacího prostředí. Práce je tedy rozšířena i o praktickou část, která přinesla diskuzi o výsledcích měření. Zmiňované vlastní měření bylo uskutečněno v bezdozvukové komoře na ÚADI VUT v Brně. Při tomto měření byl navržen nahrávací řetězec skládající se z měřících přístrojů od dánské firmy Brüel & Kjaer, které vyžadují minimum externích doplňků. Pomocí tohoto řetězce byl zachycen signál od vybraného zdroje zvuku v uzlových bodech na připravené měřicí síti. Dále za použití matematického aparátu byla získána hladina akustického tlaku. Grafický výstup z těchto vypočtených hodnot je uveden v závěru práce v kapitole prezentující výsledky.



1 HLUK

Hluk jako pojem je mnohem konkrétnější než pojem zvuk, protože hlukem je rozuměn obtěžující zvuk. Vzhledem k různým povahám člověka je obtížné rozeznat, co je považováno za příjemný poslech a co už za hluk. [13]

1.1 VZNIK HLUKU A VLNĚNÍ

Vznik hluku je způsoben pohybem částic v pružném prostředí. Pohybem částic vznikne akustická energie, která je dále přenesena do okolního akustického prostředí (plynného, kapalného, poddajných těles). [13] Příčinou hluku nebo chvění je tedy přítomnost vnějších či vnitřních dynamických sil v pružném prostředí mechanických soustav. Mechanickým kmitáním částice prostředí nastane rozruch, který se pružnými vazbami přeneše na sousední částici. Šířením rozruchu vznikne vlnění. Rozruch, který se šíří do míst, které mohou mít v daném časovém okamžiku stejnou fázi, se proloží myšlenou rovinou zvanou vlnoplocha. Tvar vlnoplochy poskytuje informaci o zdroji kmitání (o prvotním rozruchu). [20] V této práci se bude vyskytovat vlnoplocha kulového tvaru se středem v místě zdroje rozruchu, protože v bezdovukové komoře jsou upravené vlastnosti prostředí tak, aby se paprsky z bodového zdroje rozruchu šířily přímočaře všemi směry a nebyly ovlivněny.

1.2 ROZDĚLENÍ VLNĚNÍ

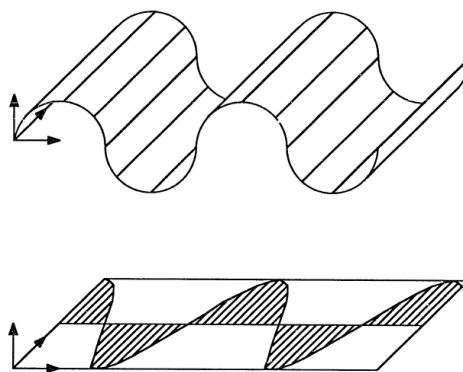
Následující rozdělení rozlišuje vlnění podle toho, jak se částice vychylují vzhledem ke směru vlnění.

1.2.1 LONGITUDINÁLNÍ VLNĚNÍ

Longitudinální vlnění nastane, pokud částice kmitají ve směru šíření vlnění. Podstatný vliv na tom, zda se vlna šíří longitudinálně nebo transversálně, mají vlastnosti prostředí, ve kterém se vlna šíří. Longitudinální vlnění lze připodobnit k rozkmitání velmi dlouhé spirálové pružiny. Částice při longitudinálním i transversálním vlnění se nepřemísťují, nýbrž kmitají kolem rovnovážných poloh. [20]

1.2.2 TRANSVERZÁLNÍ VLNĚNÍ

Transverzální vlnění nastane, pokud částice kmitají kolmo na směr šíření vlnění. Transverzální vlnění lze připodobnit ke kmitání volného konce rozkmitaného provazu. Typy vlnění jsou znázorněny na Obr. 1, přičemž směr šíření je zleva doprava. Dalším rozdělením transversálního vlnění lze pozorovat vlnění torzní (působí krouticí moment), vlnění ohybové (budící síla kolmá k ose vlnění) a Rayleighovo vlnění (proudění média kolem tělesa). [20]



Obr. 1 Longitudinální vlnění (horní) a transverzální vlnění [26]

1.3 ROZDĚLENÍ HLUKU

Následuje rozdělení hluku podle příčiny vzniku akustické energie

1.3.1 MECHANICKÝ HLUK

Mechanický hluk vznikne mechanickým kmitáním povrchů těles. Konkrétní příklady mechanického hluku se dají nalézt například ve spalovacím motoru, kdy mechanický hluk vzniká od setrvačných sil, od třecích sil kinematických dvojic, od dosedání ventilů atd. Kmitáním povrchu tělesa je způsoben rozruch prostředí, nejčastěji plynného prostředí, a dále je kmitáním způsobeno nahromadění mechanické energie, která je později uvolněna do okolního akustického prostředí. [13]

1.3.2 AERODYNAMICKÝ HLUK

Aerodynamický hluk je způsoben nestacionárním prouděním tekutiny (= kapaliny nebo plynu). Prostředí, ve kterém tento hluk vznikne, mohou být oblasti neustálého proudění tekutiny, nebo oblasti s výraznými změnami tlaku. Aerodynamický hluk způsobují například ventilátory, kompresory, úniky stlačeného plynu z trysky atd. Konkrétní příklady aerodynamického hluku ze spalovacího motoru mohou být například sání a výfuk. Lze si tedy všimnout, že ve spalovacím motoru vzniká jak mechanický hluk, tak i aerodynamický. [13]



2 ÚVOD DO AKUSTICKÝCH VELIČIN A TERMÍNŮ

V této kapitole je představena základní část akustických veličin, ze které bude čtenář čerpat v následující kapitole o bezdozvukové komoře. Později je představena další část veličin, která předchází kapitole o vlastním měření.

2.1 AKUSTICKÝ TLAK

V první kapitole je zmíněno, že částice se vychylují buď příčně ke směru šíření vlnění, nebo podélně ke směru šíření vlnění. Při takovém chování dojde v jedné části homogenního pružného prostředí ke zvětšení hustoty částic a v jiné části dojde ke snížení hustoty částic. Příkladem je situace ve vzduchu, kdy se mění tlak plynu oproti statické hodnotě atmosférického tlaku. Tato proměnná složka superponovaná atmosférickému tlaku se nazývá akustický tlak. [20]

Stejně jako atmosférický tlak, tak i akustický tlak jsou skalární veličiny, protože se nedá určit jejich směr. Hodnoty akustického tlaku mají velký rozsah hodnot, od přibližně 20 μPa do 100 Pa, což přesahuje 7 dekad, je proto výhodnější vyjádřit akustický tlak pomocí logaritmu. [13]

Základní veličinou, se kterou se tedy dá pracovat a slouží pro popis akustických veličin je akustický tlak. Akustický tlak je také nejčastěji měřená akustická veličina. Pro přesná měření se dnes výhradně používá přesných měřicích mikrofónů. Při měření akustického tlaku se musí rozlišit, zda se jedná o měření ve volném poli nebo o měření jiné. Například takové, u kterého se zjišťuje skutečný tlak na membráně mikrofónu nebo jeho přibližně střední hodnota po ploše membrány v oblasti s vyššími kmitočty. [19]

2.1.1 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

Hladina akustického tlaku je označena L_p a je definována následujícím vztahem

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (1)$$

kde referenční tlak p_0 je $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Je-li akustický tlak navýšen o jeden řád, projeví se to zvýšením hladiny akustického tlaku o 20 dB. Pro lidské vnímání je hladina akustického tlaku mezi 0 a 130 dB. [13]

2.2 KMITAVÉ DĚJE

Tato kapitola zde byla vložena z toho důvodu, aby v závěru upozornila na rozdíl mezi pohybovou rychlostí částice v a rychlostí šíření rozruchu c .

2.2.1 VÝCHYLKA

Částice, která se pravidelně a periodicky vychyluje od své klidové polohy, se pohybuje v tzv. harmonickém kmitání. Tato částice tedy kmitá kolem své rovnovážné polohy a dosahuje svých maximálních hodnot vychýlení od klidové polohy. Výchylka je veličina vektorová, neboť je určena směrem i velikostí. [20]



2.2.2 DOBA KMITU

Doba kmitu je určena časem mezi dvěma maximálními kladnými výchylkami. Odtud je možné určit úhlový kmitočet ω a poté počet celých kmitů za sekundu f (tj. kmitočet harmonického děje). [20]

2.2.3 ČASOVÉ ROZVINUTÍ HARMONICKÉHO KMITÁNÍ

Jestliže částice v náhodně zvoleném časovém okamžiku sledovaného děje není v klidové poloze, poté je třeba přidat fázový úhel φ . Průběh periodického děje sinusové funkce je možné napsat jako

$$s = s_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \text{ m} \quad (2)$$

kde výraz v závorce je fáze harmonicky proměnné veličiny a s_{max} je amplituda výchylky částice. [20]

2.2.4 POHYBOVÁ RYCHLOST ČÁSTICE

Okamžitá rychlost pohybu částice v je získána derivací výchylky podle času.

$$\begin{aligned} v &= \frac{ds}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{d(s_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi))}{d\varphi} = \omega \cdot s_{max} \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= v_{max} \cdot \cos(\omega t + \varphi) = v_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Odtud plyne závěr, že fáze rychlosti kmitání je proti fázi výchylky posunuta o 90° . [20]

2.2.5 ROZKLAD PERIODICKÝCH KMITŮ

Převod signálu na frekvenční spektrum je zajištěn Fourierovou transformací

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (4)$$

kde $g(t)$ je signál, $G(f)$ je frekvenční spektrum, e je základ přirozených logaritmů, s je komplexní proměnná rovna $s = j2\pi f$ a t je čas. Po provedení Fourierovy transformace je získán tzv. obraz funkce s jednou komplexní proměnnou s . Dle této rovnice je uskutečňována technika rychlá Fourierova transformace (FFT). Pomocí FFT je transformován signál z časové oblasti do oblasti kmitočtové. [7]

Zvukový signál je zpracován mikrofonom jako spojitá hodnota napětí odpovídající velikosti tlaku. Signál je upraven do digitální podoby vytvořením série vzorků, které mají stejné časové intervaly. Tato metoda vzorkování plyne z Shannon-Kotělnikova teorému a je podřízena Nyquistově podmínce, že vzorkovací frekvence je větší než dvojnásobek největší hodnoty frekvence v oblasti vzorkovaného signálu. [7]

2.2.6 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ROZRUCHU PROSTŘEDÍM

Rychlost šíření rozruchu v prostředí c je závislá na objemové hmotnosti prostředí ρ , teplotě prostředí δ a dalších veličinách. V nehomogenním prostředí je rychlost šíření rozruchu také



směrově závislá. [20] Následující vztah vyjadřuje rychlost šíření rozruchu ve vzduchu při teplotě vzduchu θ [K] v místě zkoušky a v době zkoušky [4]

$$c_{vzduch} = [331,82 + 0,61 \cdot (\theta - 273)] \quad (5)$$

2.2.7 VLNOVÁ DÉLKA

Pokud vlnoplocha tvoří geometrické místo bodů, ve kterém bylo dosaženo maximální okamžité hodnoty zhuštění prostředí, pak jsou dvě sousední vlnoplochy při vyzařování jednoduchého signálu s kmitočtem f a při rychlosti šíření rozruchu c od sebe vzdáleny o vlnovou délku λ vyzařovaného rozruchu. [20]

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ m} \quad (6)$$

Vlnová délka je rozhodující veličina při stanovení délky akustických klínů v bezdovzdušné komoře. Tvar a šířka těchto klínů je závislá na kmitočtovém pásmu. O tom je podrobněji pojednáno později.

2.3 AKUSTICKÝ VÝKON

Tato veličina je označena P a je definována pro danou plochu jako skalární součin akustické intenzity I a normálového vektoru plochy n . Tato veličina tedy vyjadřuje míru akustické energie vyzařovanou zdrojem, která se šíří vzduchem, za jednotku času. [4]

$$P = \iint_{(S)} \vec{I} \cdot \vec{n} dS \text{ W} \quad (7)$$

2.3.1 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Tato veličina je označována L_W . Je definována jako desetinásobek dekadického logaritmu poměru akustického výkonu P a referenční hodnoty P_0 .

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} \text{ dB} \quad (8)$$

kde referenční hodnota P_0 je 1 pW (10^{-12} W). Je-li akustický výkon navýšen o jeden řád, projeví se to zvýšením hladiny akustického výkonu o 10 dB. [4]

2.4 AKUSTICKÁ INTENZITA

Akustická intenzita I je vektor a je definována jako tok akustické energie v daném směru plochou kolmou ke směru toku, vztažený na jednotku plochy. [20]

2.5 AKUSTICKÁ IMPEDANCE

Akustická impedance je vektorová veličina Z , která vyjadřuje vlnový odpor daného akustického prostředí. Akustická impedance je vyjádřena jako konstantní poměr akustického tlaku a akustické rychlosti. Jednotkou akustické impedance je Ω , což je stejná jednotka jako má elektrický odpor a reaktance. [13]



$$Z = \rho \cdot v = \frac{p}{v} \left(\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = \Omega \right) \quad (9)$$

2.6 AKUSTICKÁ ENERGIE

Akustická energie bude v této práci označena J , vyjadřována v Joulech. Tato veličina je důležitá především pro nestacionární přerušované zvukové události. Je definována jako integrál akustického výkonu P přes určený časový interval s dobou trvání T . [5]

$$J = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (10)$$

2.6.1 HLADINA AKUSTICKÉ ENERGIE

Tato veličina je označována L_J . Je definována jako desetinásobek dekadického logaritmu poměru akustické energie J a referenční hodnoty J_0

$$L_J = 10 \log \frac{J}{J_0} \text{ dB} \quad (11)$$

kde referenční hodnota J_0 je $1 \cdot 10^{-12} \text{ J}$. [5]

2.7 INDEX SMĚROVOSTI

Index směrovosti je důležitý proto, že směrovost zdroje společně s hladinou akustického výkonu, jsou dvě základní veličiny, které charakterizují každý zdroj zvuku. [13] Tato veličina je v této práci označena D_{li} . Je definována jako míra rozsahu, ve kterém zkoušený zdroj hluku vyzařuje zvuk ve směru i -té polohy mikrofону na měřicí ploše vzhledem ke střední hodnotě vyzařování zvuku přes měřicí plochu. [5] Index směrovosti nabývá hodnoty větší než jedna ve směrech, do nichž zkoušený zdroj hluku vyzařování zvuku soustřeďuje, a hodnoty menší než jedna ve směrech, ve kterých je vyzařování zvuku potlačováno. Index směrovosti je roven jedné pro případ všesměrového vyzařování zvuku. [16]

$$D_{li} = L_{pi} - \overline{L_p} \quad (12)$$

kde L_{pi} je hladina akustického tlaku (časově průměrovaného akustického tlaku nebo časově integrovaného akustického tlaku jednotlivé zvukové události (dále jen JZU)) v i -té poloze mikrofону na měřicí ploše korigovaná na hluk pozadí, pokud je zkoušený zdroj hluku v provozu. $\overline{L_p}$ je hladina akustického tlaku (časově průměrovaného akustického tlaku nebo časově integrovaného akustického tlaku JZU). [5]

2.8 SPEKTRA VIBROAKUSTICKÝCH SIGNÁLŮ

Spektra vibroakustických signálů obsahují více frekvenčních složek s různě velkými amplitudami a fázovými posuny vůči sobě. Základní charakteristikou těchto vibroakustických signálů jsou jejich frekvenční spektra, která udávají rozložení amplitud jednotlivých frekvenčních složek v signále. [13]



2.9 OKTÁVOVÁ FREKVENČNÍ PÁSMO

Mezi spektra vibroakustických signálů spadají oktávová pásmová spektra. Tyto oktávová pásmová spektra se dále dělí na třetinooktávová, dvanáctioktávová, atp. Jednooktávové frekvenční pásmo je dáno dvěma krajními frekvencemi, které vymezují oktavu.

Třetinooktávové frekvenční pásmo je rozděleno na tři nestejná pásma (v logaritmických souřadnicích), u kterých jsou vyznačeny čtyři frekvence. Následuje vztah pro hraniční frekvence a poté vztah pro jednu třetinu oktávy

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2 \quad (13)$$

$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^3 = 2 \quad (14)$$

V praxi se osvědčilo používat právě dělení na třetinooktávová pásma, protože tyto pásma zjednodušují frekvenční spektra akustických veličin, aniž by se razantně změnila přesnost spekter. [13]

2.10 SLEDOVANÝ FREKVENČNÍ ROZSAH

Sledovaný frekvenční rozsah zahrnuje třetinooktávová pásma se jmenovitými středními frekvencemi od 100 Hz do 10 000 Hz. Pro výjimečné případy je dovoleno frekvenční rozsah rozšířit nebo zúžit za předpokladu, že zkušební prostředí a specifikace přístrojového vybavení jsou vyhovující pro použití ve zmíněném frekvenčním rozsahu. [5]

2.11 VOLNÉ ZVUKOVÉ POLE

Volné zvukové pole je zvukové pole v homogenním izotropním prostředí bez ohraničení. V praxi to znamená, že je to takové pole, ve kterém je vliv odrazů od ohraničení nebo jiných rušivých objektů zanedbatelný. [5]



3 BEZDOZVUKOVÁ KOMORA

Tato kapitola představuje vlastnosti, oblasti použití a historii bezdozvukových komor.

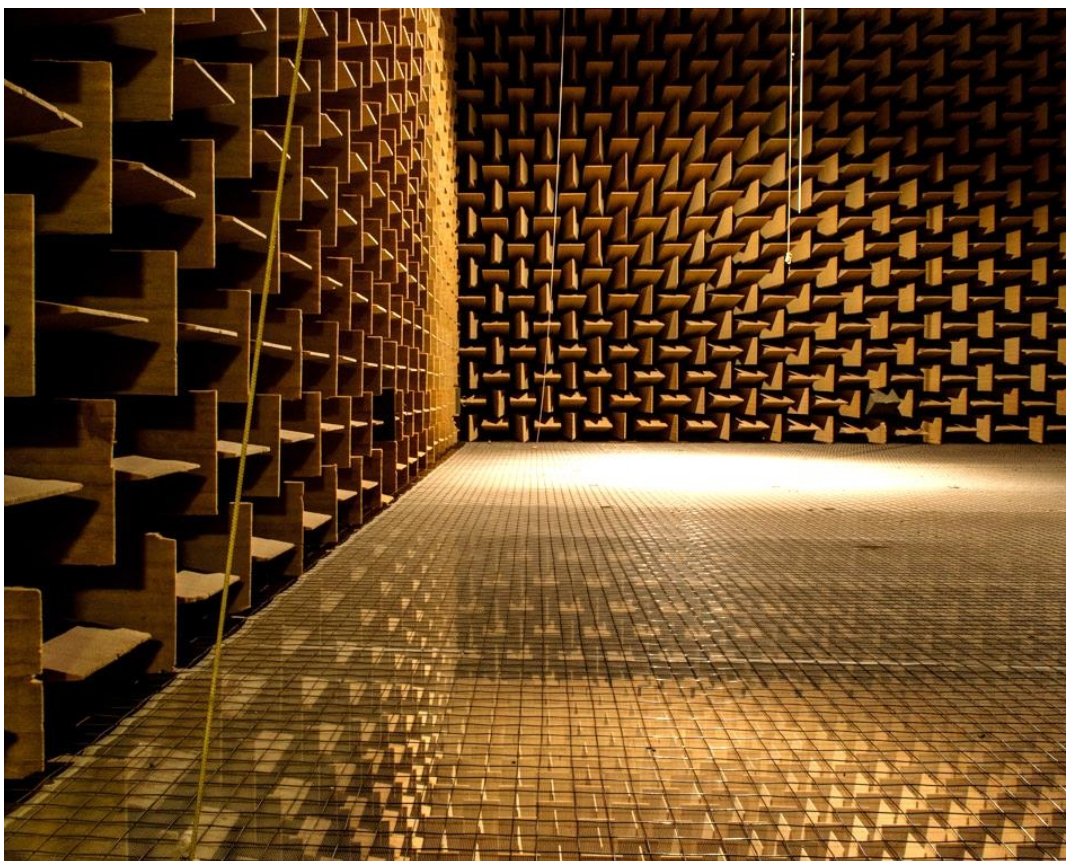
3.1 Úvod

Bezdozvuková komora obsahuje ve svém názvu pojem dozvuk. Dozvuk je doba od vypnutí zdroje zvuku do úplné ztráty trvání zvuku v místnosti. Jinými slovy je doba dozvuku čas, za který se hladina akustického tlaku v uzavřeném prostoru sníží po vypnutí zdroje zvuku o 60 dB. Bezdozvuk tedy znamená žádný čas prodloužení zvuku v místnosti po odstranění zdroje zvuku. [13]

Bezdozvuková komora je měřicí prostor, ve kterém je absorbováno všechno mechanické vlnění ze zdroje zvuku, které dopadne na stěny. V této místnosti je umístěn zdroj zvuku, který vyprodukuje zvukové pole. Toto zvukové pole ve všech ohledech odpovídá volnému zvukovému poli, které vznikne ve vzdálenosti větší než $\lambda/4$ od zdroje zvuku a skončí na hranici místnosti. Vzdálenost menší než $\lambda/4$ je oblast blízkého pole zdroje zvuku, kde se nachází tzv. Fresnelovo pole, které je charakterizováno prudkou změnou akustického tlaku. V praxi se měření v oblasti Fresnelova pole nevyužívá, a to z důvodu zbytečných problémů při měření akustických veličin. [4]

Bezdozvukové komory mají velkou oblast využití. Jsou používány výzkumníky pro určení zvukového výstupu strojů, jako jsou například plynové turbíny nebo kompresory. Dále jsou používány k určení vlivu hluku na objekt. Příkladem může být testování vlivu tryskových motorů na trup letounu. Dále jsou používány k izolování jemné přístrojové techniky od vnějších zdrojů hluku. A mnoho dalších využití. [26]

Kromě plně bezdozvukových komor. Existují však i polobezdozvukové komory, které jsou odlišeny tím, že v nich je zajištěno volné zvukové pole nad odrazivou rovinou. Odrazivá rovina je rovinný povrch odrážející zvuk, na kterém je umístěn zkoušený zdroj zvuku. [5] V praxi to obvykle znamená, že podlaha je vyrobena z těžkých cihel a betonu, aby na podlaze mohla být měřena i těžší břemena. Plně bezdozvuková komora má podlahu z ocelové mřížky, pod kterou se nachází další stěna pokrytá akustickými klíny. [19]



Obr. 2 Pohled do plně bezdozvukové komory na DTU v Dánsku [22]

3.2 HISTORICKÁ PERSPEKTIVA

Bezdozvuková, též bezodrazová, komora pracuje na principu, že energie odražených zvukových vln je téměř pohlcena obklady přítomných reflektivních ploch vyrobených z akusticky absorpčního materiálu. V ideálním případě je energie odražené zvukové vlny redukována na takovou hodnotu, kdy její vliv na systém a na měřený instrument je zanedbatelný. [26] První bezdozvuková komora byla navržena E. H. Bedellem v roce 1936, kdy byla použita vrstva dvou tkanin mušelínu a flanelu o tloušťce 18 a ½ palce (46,99 cm). V pořadí další komora byla vybudována o pár let později v Berlíně, kde bylo použito mušelínových sáčků ve tvaru pyramidy vycpaných minerální vlnou. Výzkum bezdozvukových komor začal během 2. Světové války ve Spojených státech, kdy Výzkumný výbor národní obrany tento výzkum sponzoroval na Harvardově univerzitě v Cambridge. V té době L.L. Beranek a H.P. Sleeper vytvořili 5 různých geometrických návrhů akustických klínů a přes deset různých absorpčních materiálů. [3] V roce 1942 provedl H.J. Sabine test pomocí metody koncentrických trubek, jehož výsledkem bylo, že struktura lineárních klínů má nejnižší procento odraženého akustického tlaku. [18]

Tento prostor umožňuje reprodukovatelnost měření, která se používají v akustice. Akustické parametry tohoto prostoru jsou definovány tak, aby minimalizovaly vliv okolního prostředí na měřený objekt. Za negativní vliv okolního prostředí se bere jakýkoliv přídavný rušivý prvek znemožňující přesnost akustického měření zdroje zvuku. [13]



3.3 FYZIKÁLNÍ POŽADAVKY NA BEZDOZVUKOVOU KOMORU

V této kapitole jsou uvedeny 3 základní fyzikální požadavky na bezdozvukovou komoru.

3.3.1 POŽADAVEK NA VOLNÉ ZVUKOVÉHO POLE

U bezdozvukových komor je důležitým cílem přiblížit se vytvoření volného zvukového pole. Takové pole předpokládá neomezené šíření akustické energie od zdroje do všech směrů rovnoměrně. Akustický tlak ve volném zvukovém poli je dán vztahem, ke kterému je třeba dojít úpravami základních akustických veličin. Akustická intenzita je vektorová veličina, která popisuje množství a směr toku akustické energie v daném místě. Vektor akustické intenzity I [W/m^2] je časově průměrovaný

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)}, \quad (15)$$

kde $p(t)$ je okamžitý akustický tlak a $v(t)$ odpovídá okamžité rychlosti kmitajících částic prostředí v tomtéž místě. S využitím akustické analogie s Ohmovým zákonem, se může pro rovinnou akustickou vlnu ve volném poli, která se šíří rychlostí c , napsat vyjádření rychlosti v [m/s] kmitajících částic

$$v = \frac{p}{\rho \cdot c}, \quad (16)$$

kde p [Pa] je akustický tlak, c [m/s] je rychlost zvuku a ρ [kg/m^3] objemová hmotnost prostředí. Akustické zdroje se mohou popisovat jako bodové zdroje. Je tomu tak za předpokladu, že rozměry akustických zdrojů jsou malé v porovnání se vzdáleností od příjemce nebo měřicího bodu. Pokud neuvažujeme ztráty vlněním u bodového zdroje, pak výstupní výkon zdroje prochází sférickou plochou poloměru r . Vyjádření akustické intenzity této plochy je

$$I = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (17)$$

kde P [W] je akustický výkon, který roste se vzdáleností r [m]. Vztah ve jmenovateli vyjadřuje, že se zvuk šíří v kulových vlnoplochách. Akustický výkon představuje množství akustické energie procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou. Akustický výkon je definován

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = p \cdot v \cdot S, \quad (18)$$

Nyní budou provedeny úpravy za účelem získání vztahu akustického tlaku p^2 [Pa^2] ve vzdálenosti r a ve směru od bodového zdroje.

$$I = p \cdot v = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \Rightarrow p^2 = I \cdot \rho \cdot c = \frac{P \cdot \rho \cdot c \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (19)$$

kde Q [-] je faktor směrovosti zdroje. Tento faktor je definován poměrem efektivních hodnot akustických tlaků u zdroje směrového a zdroje nesměrového, které byly změřeny ve stejné vzdálenosti od zdroje zvuku. Další možností je tento faktor vyjádřit jako podíl akustické intenzity směru daného úhlem ϑ od zdroje k akustické intenzitě nesměrového zdroje (při konstantní vzdálenosti). Při další úpravě vztahu se v exponentu nachází $L_{p\vartheta}$ (resp. L_{ps}), což je



naměřená hladina akustického tlaku ve vzdálenosti r a úhlu ϑ od zdroje (resp. nesměrového zdroje) vyzařující výkon W ve volném akustickém poli. [13]

$$Q_{\vartheta} = \frac{p_{\vartheta}^2}{p_s^2} = \frac{I_{\vartheta}}{I_s} = \frac{10^{0,1 \cdot L_{p\vartheta}}}{10^{0,1 \cdot L_{ps}}} \quad (20)$$

3.3.2 POŽADAVEK NA VYSOKÝ ČINITEL POHLTIVOSTI ZVUKU

U bezdozvukových komor je důležitým cílem dosáhnout vysoké pohltivosti stěn. Toho je dosaženo použitím vysoce pohltivých materiálů o vysoké hodnotě činitele pohltivosti α . Tento činitel je poměr energie pohlcené povrchem W_p [J] k energii dopadající na povrch W_d [J]

$$\alpha = \frac{W_p}{W_d} = 1 - |R^2|, \quad (21)$$

kde R [-] je součinitel odrazu, který je definován jako podíl akustických tlaků odražené a dopadající akustické vlny. Koeficient α je v rozmezí $0 \leq \alpha \leq 1$. V případě $\alpha = 0$ nastává situace, že absorbér nepohlcuje energii. V případě $\alpha = 1$ nastává, že absorbér zcela pohltí dopadající energii. U akustických komor dosahuje α hodnoty téměř 0,99. [13]

Zpravidla je u bezdozvukových komor požadováno dosažení činitele zvukové pohltivosti 99 %. Rovněž je přijatelné dosažení 90 %, kdy lze očekávat chybu měření vlivem interference s odraženými vlnami uvnitř prostoru menší než ± 1 dB. Dosažení vysoké pohltivosti materiálů v bezdozvukových komorách je zvláště obtížné v oblasti nízkých kmitočtů, protože podmínky blízké volnému akustickému poli nelze uskutečnit v oblasti takových kmitočtů, jejichž vlnové délky jsou větší než vnitřní rozměry komory. [19]

Materiály, které mají vysokou hodnotu činitele pohltivosti, jsou většinou porézní materiály. Z těchto materiálů jsou stavěny akustické klíny. Tvar a velikost (šířka) těchto klínů je různá. Mění se v závislosti na kmitočtovém pásmu. Např. pro kmitočty vyšší než 300 Hz postačí pro pohltivost 90 % rovná deska o tloušťce 80 mm. Pro kmitočty nižší než 100 Hz je nutné použít jehlany nebo klíny. Délka klínu je obvykle $\frac{1}{4}$ vlnové délky spodní frekvence. Např. pro 100 Hz se užívají klíny s délkou 915 mm. [14] Při výrobě klínů je důležité, aby byly ostře ořezány. Větší koncové plochy a větší odrazivost konců by se projevila nepříznivě v oblasti vyšších kmitočtů. Pro zmenšení odrazů vlivem prostorové periodicity konstrukce je zvolena střídavá orientace zakončujících hran klínů. [19]



Materiál	t [mm]	α [-] při frekvenci f					
		f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Azbest	25	0,25	0,6	0,65	0,6	0,6	0,61
Beton	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Deska akustická absorpční z dřevěných hoblin s přidavkem struskové vaty a pojidla	25	0,08	0,24	0,55	0,78	0,78	0,74
Deska akustická absorpční (speciálně upravená)	25	0,22	0,51	0,89	0,98	0,71	0,66
Kámen leštěný	-	0,1	-	0,01	-	-	0,02
Koberec tkaný (na betonovém podkladu)	9,5	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
Koberec tkaný (na lepence tloušťky 3.10-3 m)	8	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Linoleum (na betonovém podkladu)	3	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
Písek (suchý)	100	0,15	0,35	0,4	0,5	0,55	0,8
Plst	25	0,12	0,32	0,51	0,62	0,60	0,56
Překližka dřevěná (trojvrstvá)	3	0,2	0,28	0,26	0,09	0,12	0,11
Sníh	25	0,15	0,40	0,65	0,75	0,80	0,85
	100	0,45	0,75	0,90	0,95	0,95	0,95
Škvára	280	0,90	0,90	0,75	0,80	-	-
Štuk na kovovém pletivu	19	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Vata skelná (nalisovaná)	25	0,24	0,30	0,57	0,69	0,70	-
	51	0,38	0,49	0,84	0,91	0,76	-
Vata strusková	25	0,26	0,45	0,61	0,72	0,75	-
Vlákna skelná pojená pryskyřicí	25	0,20	0,41	0,75	0,86	0,86	0,82
	51	0,41	0,60	0,99	0,99	0,84	0,85
Závěs velurový	-	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
Zed' cihlová	-	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07

Obr. 3 Hodnoty činitele zvukové pohltivosti různých materiálů [25]

3.3.3 POŽADAVEK NA VYSOKÝ STUPEŇ VZDUCHOVÉ NEPRŮZVUČNOSTI

U bezdozvukových komor je důležitým cílem zajistit, aby hluk pozadí neovlivnil výsledek měření. Hluk pozadí je vytvářen mimo komoru. Hodnoty neprůzvučnosti se udávají v decibelech. Tyto hodnoty sdělují, o kolik dB bude zvuk po průchodu nižší. V těchto komorách se obvykle nachází hodnota hladiny šumu mezi 10 a 20 dB. Pokud označíme stupeň vzduchové neprůzvučnosti R , pak je nutné ze známých hladin L_1 a L_2 zavést korekční člen. Tento člen bude respektovat charakter přijímacího prostoru. Rozdíl odpovídajících hladin hluku se nazývá stupeň zvukové izolace D . Je dán rozdílem hladiny intenzity zvuku ve druhé místnosti L_2 od hladiny intenzity zvuku v první místnosti L_1 . Stupeň zvukové izolace souvisí s koeficientem zvukové průzvučnosti τ , který je definován výrazem

$$\tau(\Phi, \omega) = \frac{I_t(\Phi, \omega)}{I_0(\Phi, \omega)}, \quad (22)$$

kde I_t je transferovaná intenzita zvuku, který projde do vedlejší místnosti, I_0 je původní intenzita zvuku, Φ je úhel dopadu akustické vlny a ω je frekvence akustické vlny. Intenzita



prošla odpovídá intenzitě I_2 ve druhé místnosti. Intenzita původní odpovídá intenzitě zvuku v první místnosti I_1 . Stupeň zvukové izolace může být změřen pomocí dvou hladin intenzity

$$L_1 - L_2 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \cdot \log \frac{I_0}{I_t}, \quad (23)$$

$$L_1 - L_2 = D = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau}. \quad (24)$$

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti R ze stupně zvukové izolace je vyjádřen zjednodušeným vztahem

$$R = D + 10 \cdot \log \frac{S}{A}, \quad (25)$$

kde S je plocha dělicího členu a A je celková pohltivost přijímací místnosti. Tato celková absorpce povrchů místnosti je dána

$$A = \alpha_S \cdot S \quad (26)$$

kde α_S je střední činitel zvukové pohltivosti místnosti a S je součet ploch povrchů místnosti.

Schopnost tlumit zvuky z pozadí, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků měření, může vyjadřovat i tento vztah

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \cdot \log \frac{S}{A}, \quad (27)$$

kde L_{p1} je hladina akustického tlaku ve vysílací místnosti a L_{p2} je hladina akustického tlaku v přijímací místnosti. [17]



4 ROZŠÍŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN A TERMÍNŮ

V této kapitole je představena další část veličin, která předchází kapitole o vlastním měření.

4.1 DEFINICE TERMÍNŮ

V následujících podkapitolách jsou představeny termíny, které je nezbytné znát pro další práci související s určováním hladin akustického výkonu a hladin akustické energie.

4.1.1 HLADINA ČASOVĚ PRŮMĚROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU

Tento termín se označuje $L_{p,T}$. Index T se běžně vynechává, protože hladiny časově průměrovaného akustického tlaku se vždy určují v jistém časovém intervalu. Hladina časově průměrovaného akustického tlaku je definována jako desetinásobek dekadického logaritmu podílu časově průměrované druhé mocniny akustického tlaku p během stanoveného časového intervalu o době trvání T a druhé mocniny referenční hodnoty p_0 . [5]

$$L_{p,T} = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \text{ dB} \quad (28)$$

Rovnice (28) je obecná rovnice časově průměrované hladiny akustického tlaku, ve které je důležitá odmocnina střední hodnoty kvadrátu (RMS=root mean square). Tato odmocnina se v případě digitálního signálu dá vyjádřit jako (30), kde p je hodnota akustického tlaku pořízeného mikrofonom či zvukoměrem, k je index po sobě jdoucích nahrávek a K je délka nahrávky odpovídající celkovému počtu vzorků. [20, 23]

$$L_{p,T} = 20 \log \left\{ \frac{\left[(1/T) \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \right]^{1/2}}{p_0} \right\} \quad (29)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K p^2}{K}} \quad (30)$$

4.1.2 HLADINA ČASOVĚ INTEGROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU JEDNOTLIVÉ ZVUKOVÉ UDÁLOSTI

Tato veličina se označuje L_E . Je definována jako desetinásobek dekadického logaritmu podílu integrálu druhé mocniny akustického tlaku p jednotlivé izolované zvukové události (série pulzů nebo přechodového děje) přes daný časový interval T a referenční hodnoty E_0

$$L_E = 10 \log \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{E_0^2} \right] \text{ dB} \quad (31)$$

$$L_E = L_{p,T} + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (32)$$

kde referenční hodnota $E_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa. Tato veličina může být získána i snadněji z výrazu (32), kde $T_0 = 1$ s. [1,8]



4.1.3 CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR ZDROJE

Je definován jako vzdálenost od počátku souřadného systému k nejvzdálenějšímu rohu referenční obalové plochy, pokud je referenční obalová plocha definována jako hypotetický pravoúhlý rovnoběžnostěn, který právě obklopuje zdroj včetně všech významných součástí vyzařujících zvuk, a zkušebního stolu, na kterém je dovoleno zdroj umístit, v případě polobezodrazové místnosti musí referenční obalová plocha končit na odrazivé rovině. [5]

4.1.4 HLUK POZADÍ

Hluk pozadí je hluk všech zdrojů. Výjimku tvoří měřený zdroj hluku. Tento hluk pozadí zahrnuje příspěvky zvuku šířeného vzduchem. Také je to hluk z vibrací, který se šíří konstrukcí a elektrický šum v přístrojích.

4.1.5 KOREKCE NA HLUK POZADÍ

Korekce K_I [dB] se používá na všechny hladiny akustického tlaku, které se měří na měřicí ploše, u které je potřeba zohlednit vliv hluku pozadí.

4.1.6 HLADINA ČASOVĚ PRŮMĚROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU NA PLOŠE

Tato hladina, která se označuje $\overline{L_p}$, je definována jako energetický průměr hladin časově průměrovaného akustického tlaku ze všech poloh mikrofону nebo drah posuvu na měřicí ploše, s korekcí na hluk pozadí K_I , která se použije pro každou polohu mikrofону nebo příčnou dráhu.

$$\overline{L_p} = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 \cdot L_{pi}(ST)}}{N_M} \right] \text{ dB} \quad (33)$$

kde $L_{pi}(ST)$ je hladina průměrovaného akustického tlaku korigovaná na hluk pozadí v i -té poloze mikrofону nebo dráze posuvu na měřicí ploše, jestliže je měřený zdroj zvuku v provozu. N_M je počet poloh mikrofónů nebo drah posuvu. [5]

4.1.7 HLADINA ČASOVĚ INTEGROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU JZU

Tato hladina, která se označuje $\overline{L_E}$, je definována jako energetický průměr hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU ze všech poloh mikrofону na měřicí ploše, s korekcí na hluk pozadí K_I , která se použije pro každou polohu mikrofónu.

$$\overline{L_E} = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 \cdot L_{Ei}(ST)}}{N_M} \right] \text{ dB} \quad (34)$$

kde $L_E(ST)$ je hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU korigovaná na hluk pozadí v i -té poloze mikrofónu na měřicí ploše, pokud je zkoušený zdroj zvuku v provozu. N_M je počet poloh mikrofónů. [5]

4.1.8 INDEX NEROVNOMĚRNOSTI HLADINY MĚŘENÝCH HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU

Tato veličina bude označována V_I . Je definována jako míra variability měřených hladin akustického tlaku na měřicí ploše



$$V_I = \sqrt{\frac{1}{(N_M - 1)} \sum_{i=1}^{N_M} (L_{pi} - L_{pav})^2} \quad (35)$$

kde L_{pav} je aritmetický průměr hladin akustického tlaku (časově průměrovaného akustického tlaku nebo časově integrovaného akustického tlaku JZU) zkoušeného zdroje hluku korigovaných na hluk pozadí ze všech poloh mikrofonu na měřicí ploše. [5]

4.2 REFERENČNÍ METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY

Tyto podmínky jsou zavedeny pro vypočítání hladiny akustického výkonu a hladiny akustické energie tak, aby odpovídaly referenční charakteristické akustické impedanci

$$\rho_c = 415,5 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}, \quad (36)$$

pro tuto akustickou impedanci odpovídají hodnoty uvedené v Tab. 1. [5]

Tab. 1 Referenční meteorologické podmínky [5]

Teplota vzduchu	23,0 °C
Statický tlak	101,325 kPa
Relativní vlhkost	50 %

4.3 URČOVÁNÍ HLADIN AKUSTICKÉHO VÝKONU A HLADIN AKUSTICKÉ ENERGIE

4.3.1 MĚŘENÍ VE ZKUŠEBNÍ MÍSTNOSTI

Aby postup měření byl použitelný, musí být místnosti způsobilé k měření. Následující kapitoly zpracovány podle [5].

Zdroj, u kterého jsou hladiny akustického tlaku určeny zvukem, který má příliš vysokou nebo příliš nízkou frekvenci, a tyto frekvence jsou mimo sledovaný jmenovitý frekvenční rozsah, musí se sledovaný frekvenční rozsah rozšířit.

4.3.2 MĚŘENÍ METEOROLOGICKÝCH PODMÍNEK

Je nutné během provádění zkoušek měřit meteorologické podmínky v blízkosti zdroje hluku.

4.3.3 PODMÍNKY PROSTŘEDÍ A POLOHY MIKROFONU

Vliv prostředí se může nepříznivě projevit na použitých mikrofonech během měření. Je třeba myslet na vhodné umístění mikrofonů do míst, kde se dá vyloučit např. silné elektrické nebo magnetické pole, kontakt s prouděním vzduchu a dalšími nepříznivými účinky na měření.

Pokud je potřeba měřit hladiny akustického tlaku na kulové nebo polokulové ploše, musí se použít jedno ze čtyř uspořádání, které jsou uvedeny níže, nebo uspořádání stanovené uživatelem podléhající jistým předpisům.



1. USPOŘÁDÁNÍ

Sestava pevných poloh mikrofonu, jež jsou umístěny na měřicí ploše v bezodrazové místnosti a polobezodrazové místnosti.

Jestliže platí následující rovnost, pak obecně postačuje 20 poloh mikrofonu na polokulové měřicí ploše v polobezdovukové komoře.

$$L_{pmax} - L_{pmin} < \frac{1}{2} n_M \quad (37)$$

V případě, že tato rovnost neplatí, tzn. číselná hodnota rozdílu maximální hladiny akustického tlaku a minimální hladiny akustického tlaku je rovna polovině počtu poloh mikrofonu, nebo je větší než polovina počtu poloh mikrofonu, pak je zavedena další sestava, která obsahuje doplňkových 20 měřících bodů. To znamená rozšíření 20 měřících bodů na 40 měřících bodů ve dvou sestavách.

V případě, že stále není splněna podmínka dostatečného počtu poloh mikrofonu, je doporučeno analyzovat hladinu akustického tlaku v té oblasti měřicí plochy polokoule, kde je pozorováno vyzařování vysoce směrového zdroje. Touto analýzou je docíleno zjištění krajních hodnot hladin akustického tlaku. Následně je zapotřebí pomocí výpočtů přiřadit polohám mikrofonu komplikovanější plošné obsahy měřicí plochy.

2. USPOŘÁDÁNÍ

Jeden mikrofon je v pohybu. Tento pohyb je ve směru několikanásobných drah kruhového tvaru, které jsou pravidelně rozmístěny na měřicí ploše. Také je dovoleno pevně umístit mikrofon a nechat zdroj otáčet o 360° (nebo o násobky tohoto úhlu).

3. USPOŘÁDÁNÍ

Jeden mikrofon je v pohybu. Tento pohyb je ve směru několikanásobných drah poledníkových oblouků, které jsou pravidelně rozmístěny na měřicí ploše.

4. USPOŘÁDÁNÍ

Jeden mikrofon je v pohybu. Tento pohyb je po spirálové dráze okolo svislé osy měřicí plochy.

4.4 URČOVÁNÍ HLADIN AKUSTICKÉHO VÝKONU ZDROJE HLUKU

Nyní budou uvedeny základní metody pro určení hladiny akustického výkonu na základě měření hladin akustického tlaku.

4.4.1 MĚŘENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU

Hladiny časově průměrovaného akustického tlaku zkoušeného zdroje zvuku $L'_{pi(ST)}$ se získávají v každé poloze mikrofonu nebo pro každou dráhu posuvu mikrofonu během typické pracovní periody zdroje a pro každý zvolený pracovní režim. Jestliže jsou hladiny akustického tlaku proměnné v čase, musí se pečlivě vybrat interval pozorování a upozornit na to v protokolu o zkoušce. Tento interval pozorování se volí na základě frekvenčního pásma se střední frekvencí. Nižší nebo rovna 160 Hz musí mít interval pozorování minimálně 30 s. Vyšší nebo rovna 200 Hz musí mít dobu pozorování minimálně 10 s. [5] Po měření hladin



akustického tlaku zdroje zvuku je zapotřebí získat také hladiny časově průměrovaného akustického tlaku hluku pozadí L_{pi} v jednotlivých polohách mikrofonu nebo s mikrofonom, který se pohybuje po dráze za stejný časový interval měření.

4.4.2 KOREKCE NA HLUK POZADÍ

Pro výpočet korekce na hluk pozadí K_{1i} v i -té poloze mikrofonu nebo pro i -tou dráhu posuvu mikrofonu v každém třetinooktávovém pásmu se musí použít vztah (28), který může být zjednodušen pomocí platných podmínek převzatých z [5].

$$K_{1i} = -10 \log(1 - 10^{-0,1\Delta L_{pi}}) \text{ dB} \quad (38)$$

kde $\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}$, ve které je $L'_{pi(ST)}$ hladina časově průměrovaného akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu měřená v i -té poloze mikrofonu nebo na i -té dráze posuvu mikrofonu za provozu měřeného zdroje hluku a $L_{pi(B)}$ je hladina časově průměrovaného akustického tlaku hluku pozadí v třetinooktávovém pásmu v i -té poloze mikrofonu nebo na i -té dráze posuvu mikrofonu.

Jestliže $\Delta L_{pi} \geq 15$ dB, pak $K_{1i} = 0$.

Jestliže $6 \text{ dB} \leq \Delta L_{pi} < 15$ dB pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi 200 Hz a nižšími a 6300 Hz a vyššími, pak K_{1i} počítáme dle rovnice (38).

Jestliže $10 \text{ dB} \leq \Delta L_{pi} < 15$ dB pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi od 250 Hz do 5000 Hz, pak K_{1i} počítáme dle rovnice (38).

Jestliže $\Delta L_{pi} < 6$ dB pro jedno nebo více třetinooktávových pásem se střední frekvencí 200 Hz a nižšími frekvencemi a se střední frekvencí 6300 Hz a vyššími frekvencemi, pak $K_{1i} = 1,26$ dB.

Jestliže $\Delta L_{pi} < 10$ dB pro jedno nebo více třetinooktávových pásem se středními frekvencemi od 250 Hz do 5000 Hz, pak $K_{1i} = 0,46$ dB.

4.4.3 VÝPOČET HLADIN ČASOVĚ PRŮMĚROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU

Následující kapitoly jsou rozděleny, vzhledem k výpočtu hladin časově průměrovaného akustického tlaku, podle plošných obsahů na měřící ploše a podle dráhy posuvu mikrofonu.

MĚŘÍCÍ PLOCHA S OBLASTMI, KTERÉ MAJÍ SHODNÉ PLOŠNÉ OBSAHY

Časově průměrovaný akustický tlak na ploše, který má pevné polohy mikrofonu nebo kruhové dráhy posuvu mikrofonu s jednotlivými oblastmi o shodných obsazích plochy, se musí vypočítat

$$\overline{L_p} = 10 \log \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right] \text{ dB} \quad (39)$$

kde $\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - K_{1i}$ a N_M je počet poloh mikrofonu. [5]



MĚŘÍCÍ PLOCHA S OBLASTMI, KTERÉ NEMAJÍ SHODNÉ PLOŠNÉ OBSAHY

Časově průměrovaný akustický tlak na ploše, který má pevné polohy mikrofonu nebo kruhové dráhy posuvu mikrofonu s jednotlivými oblastmi o neshodných obsazích plochy, se musí vypočítat

$$\overline{L_p} = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right] \text{ dB} \quad (40)$$

kde $\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - K_{1i}$, N_M je počet poloh mikrofonu, S_i je dílčí plošný obsah měřicí plochy vztažený k i -té poloze mikrofonu nebo dráze posuvu a S je plošný obsah celkové měřicí plochy. [5]

HLADINY ČASOVĚ PRŮMĚROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU NA MĚŘÍCÍ PLOŠE ZA POUŽITÍ POLEDNÍKOVÉ NEBO SPIRÁLOVÉ DRÁHY POSUVU

Jestliže se mikrofon pohybuje po dráze poledníkové nebo spirálové, pak se hladina časově průměrovaného akustického tlaku získá kvadratickým a průměrováním výstupu mikrofonu a přisouzením vhodného váhového činitele k plošným obsahům povrchu koule. [5]

4.4.4 VÝPOČET HLADIN AKUSTICKÉHO VÝKONU

Následující kapitoly jsou rozděleny, vzhledem k výpočtu hladin akustického výkonu, podle typu akustických komor a podle odlišnosti meteorologických podmínek.

HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU V BEZODRAZOVÉ MÍSTNOSTI

Hladina akustického výkonu ve volném poli v každém sledovaném frekvenčním pásmu nebo vážená funkcí, za referenčních meteorologických podmínek se musí vypočítat

$$L_W = \overline{L_p} + 10 \log \left(\frac{S_1}{S_0} \right) \text{ dB} + C_1 + C_2 + C_3 \quad (41)$$

kde $\overline{L_p}$ je hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše zkoušeného zdroje hluku, S_1 je plošný obsah kulové měřicí plochy, S_0 je 1 m². [13]

C_l je korekce na referenční veličiny. Tato korekce bere v úvahu rozdíly mezi referenčními veličinami, které se používají k výpočtu hladiny akustického tlaku a hladiny akustického výkonu. Tato korekce je funkcí změny charakteristické akustické impedance vzduchu za meteorologických podmínek v době měření a v místě měření

$$C_1 = 10 \log \left[\frac{p_0^2 \cdot S}{\rho_c \cdot p_0} \right] = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 5 \log \left[\frac{273 + \theta}{\theta_0} \right] \text{ dB} \quad (42)$$

kde p_0 je referenční akustický tlak, ρ_c je charakteristická akustická impedance vzduchu v čase a v místě zkoušky, p_0 je referenční akustický výkon, p_s je statický tlak v kPa v době a v místě zkoušky, $p_{0,s}$ je referenční statický tlak (=101,325 kPa), θ je teplota vzduchu v době a v místě zkoušky ve stupních Celsia. θ_0 (= 314 K) je teplota, pokud je statický tlak roven tlaku statickému referenčnímu, při kterém jsou shodné hodnoty akustického tlaku a akustické intenzity. θ_1 (=296 K). [8]



C_2 je korekce na akustickou vyzařovací impedanci. Tato korekce převádí aktuální akustický výkon za meteorologických podmínek v době a v místě měření na akustický výkon za referenčních meteorologických podmínek. Hodnota se dá získat ze zkušební předpisu pro hluk. Jestliže neexistuje zkušební předpis pro hluk, pak platí rovnice platná pro zdroj typu monopól a pro ostatní zdroje je střední hodnotou. [6, 9]

$$C_2 = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 15 \log \left[\frac{(273 + \theta)}{\theta_1} \right] \text{ dB} \quad (43)$$

C_3 je korekce na pohltivost vzduchu na specifických frekvencích

$$C_3 = A_0(1,0053 - 0,0012A_0)^{1,6} \text{ dB} \quad (44)$$

kde A_0 je číselná hodnota $\propto (f)r$, ve které je $\propto (f)$ součinitel útlumu pro specifickou teplotu, statický tlak, vlhkost jako funkce frekvence podle (22) a (24), r je měřicí poloměr. Součinitel $\propto (f)$ má přibližně hodnotu mezi $0,004 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$ a $0,002 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$ při frekvenci vyšší než 1 kHz a hodnotu mezi $0,1 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$ a $0,3 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$ při frekvenci vyšší než 10 kHz. Hodnota součinitele $\propto (f)$ tedy vzrůstá s frekvencí. [10]

HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU V POLOBEZODRAZOVÉ MÍSTNOSTI

Hladina akustického výkonu v každém sledovaném frekvenčním pásmu nebo vážená funkcí ve volném poli nad odrazivou rovinou se počítá jako

$$L_W = \overline{L_p} + 10 \log \left(\frac{S_2}{S_0} \right) \text{ dB} + C_1 + C_2 + C_3 \quad (45)$$

kde $\overline{L_p}$ je hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše pro zkoušený zdroj hluku, S_2 je plošný obsah polokulové měřicí plochy, S_0, C_1, C_2 a C_3 jako v (35).

HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU ZA ROZDÍLNÝCH METEOROLOGICKÝCH PODMÍNEK

Hladina akustického výkonu se počítá podle příslušného zkušební předpisu pro hluk. Tato hladina akustického výkonu je vyzařována stejným zdrojem hluku za odlišných meteorologických podmínek. Jestliže zkušební předpis pro hluk neexistuje, pak je možné použít rovnici platnou pro zdroj typu monopól a představující střední hodnotu pro další zdroje

$$L_{W_{met}} = L_W + 10 \log \frac{p_{s,met}}{p_{s,0}} - 15 \log \left[\frac{(273 + \theta_{met})}{\theta_1} \right] \text{ dB} \quad (46)$$

kde $p_{s,met}$ je statický tlak uvedený v kPa a θ_{met} je teplota vzduchu uvedená ve stupních Celsia. [6, 9]

4.5 URČOVÁNÍ HLADIN AKUSTICKÉ ENERGIE ZDROJE VYZAŘUJÍCÍHO IMPULSNÍ HLUK

Následující kapitoly se zabývají měřením hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU s ohledem na zdroj hluku vyzářující impulsní hluk a výpočty za uvedených okolností.



4.5.1 MĚŘENÍ HLADIN ČASOVĚ INTEGROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU JZU

Hladiny časově integrovaného akustického tlaku JZU se měří v každé poloze mikrofону v průběhu časového intervalu. Tento interval zahrnuje úplnou sérii pulzů hluku. U zdroje, který vyzařuje sérii pulzů hluku, se provádí měření v pevných polohách mikrofónů. Měřicí plocha musí být kulová nebo polokulová. Hladiny časově integrovaného akustického tlaku JZU jsou získány v každé poloze mikrofónu pro jednotlivou zvukovou emisní událost v čase nebo z několika emisních zvukových událostí za sebou. Jestliže akustická energie JZU má dostatečnou opakovatelnost, pak je možné zmírnit požadavek na měření a neměřit současně ve všech polohách mikrofónu. Před měřením nebo ihned po měření hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU měřeného zdroje zvuku se musí zjistit hladina časově průměrovaného akustického tlaku hluku pozadí ve všech polohách mikrofónu za definovaný časový interval. [5]

4.5.2 VÝPOČET HLADIN ČASOVĚ INTEGROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU JZU NA PLOŠE

Pokud se N_e hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU měří najednou v i -té poloze mikrofónu, pak se střední hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU musí vypočítat

$$L'_{Ei(ST)} = 10 \log \left[\frac{1}{N_e} \sum_{q=1}^{N_e} 10^{0,1 L'_{Ei,q(ST)}} \right] \text{ dB} \quad (47)$$

kde $L'_{Ei,q(ST)}$ je hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU ve frekvenčních pásmech nebo vážená funkcí v i -té poloze pro q -tou událost a N_e je počet měření jednotlivých emisních zvukových událostí.

Pokud hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU obsahuje N_e emisních zvukových událostí, pak se střední hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU pro jednu událost $L'_{Ei(ST)}$, musí vypočítat podle (42). Korekce na hluk pozadí a hladiny časově integrovaného akustického tlaku JZU na ploše $\overline{L_E}$ se musí vypočítat za použití průměrných hladin časově integrovaného akustického tlaku JZU. [5]

$$L'_{Ei(ST)} = L'_{Ei,N_e(ST)} - 10 \log N_e \text{ dB} \quad (48)$$

4.5.3 VÝPOČET HLADIN AKUSTICKÉ ENERGIE

Následující kapitoly se zabývají výpočty hladin akustické energie podle typu měřicího prostoru.

HLADINA AKUSTICKÉ ENERGIE V BEZDOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI

Hladina akustické energie ve volném poli v každém sledovaném frekvenčním pásmu nebo vážená funkcí se za referenčních meteorologických podmínek musí vypočítat z rovnice

$$L_J = \overline{L_E} + \log \left(\frac{S_1}{S_0} \right) \text{ dB} + C_1 + C_2 + C_3 \quad (49)$$

kde $\overline{L_E}$ je hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU pro zkoušený zdroj hluku, S_1 je plošný obsah kulové měřicí plochy, S_0 je 1 m^2 , korekce na referenční veličiny jsou stejné jako v (35, 36, 37).



HLADINA AKUSTICKÉ ENERGIE V POLOBEZDOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI

Hladina akustické energie v polobezodrazové místnosti ve volném poli nad odrazovou rovinou se v každém sledovaném frekvenčním pásmu nebo vážená funkcí musí vypočítat za referenčním meteorologických podmínek jako

$$L_J = \overline{L_E} + 10 \log \left(\frac{S_2}{S_0} \right) \text{ dB} + C_1 + C_2 + C_3 \quad (50)$$

kde S_2 je plošný obsah polokulové měřicí plochy, ostatní veličiny a korekce už byly zmiňovány v předešlých rovnicích.

4.6 VÝPOČET INDEXŮ SMĚROVOSTI

Index směrovosti je vypočítán ve směru i -té polohy mikrofону podle rovnice (29).

4.7 VÝPOČET INDEXU NEROVNOMĚRNOSTI HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU NA MĚŘICÍ PLOŠE

Index nerovnoměrnosti na měřicí ploše pro daný poloměr je vypočítán, pokud je dán požadavek, podle rovnice (30).

4.8 HLADINA AKUSTICKÉ ENERGIE A FREKVENČNĚ VÁŽENÁ HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Výpočet hladiny akustického výkonu se musí vypočítat

$$L_W = 10 \log \sum_{j=j_{min}}^{j_{max}} 10^{0,1(L_{W,j}+C_j)} \text{ dB} \quad (51)$$

kde $L_{W,j}$ je hladina akustického výkonu v j -tém třetinooktávovém pásmu, j a C_j jsou tabulkové hodnoty a j_{min} a j_{max} jsou hodnoty odpovídající nejnižšímu a nejvyššímu třetinooktávovému pásmu měření. [5]



5 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistoty hladin akustického výkonu $u(L_W)$ a hladin akustické energie $u(L_J)$ se v souladu s mezinárodní normou [5] odhadují pomocí celkové směrodatné odchylky σ_{tot} . Zmiňovaná směrodatná odchylka je získána matematickým modelem. V případě minima informací je matematický model nahrazen výsledky měření. Tyto výsledky měření musí obsahovat i výsledky z mezilaboratorních porovnávacích zkoušek.

5.1 CELKOVÁ SMĚRODATNÁ ODCHYLKA σ_{tot}

Celková směrodatná odchylka se dá vyjádřit pomocí směrodatné odchylky reprodukovatelnosti metody σ_{R0} a směrodatné odchylky σ_{omc} , která popisuje nejistotu vzniklou nestabilitou podmínek provozu a uchycení měřeného zdroje. [5]

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{R0}^2 + \sigma_{omc}^2} \text{ dB} \quad (52)$$

5.2 ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ

Rozšířená nejistota měření U se musí vypočítat podle rovnice (47). Tato nejistota závisí na požadovaném stupni konfidence. Konfidenční interval je interval, ve kterém s určitou pravděpodobností leží skutečná (pravá) hodnota. V případě normálního rozdělení je 95 % konfidence, když skutečná hodnota leží v rozsahu $< L_W - U(L_J - U); L_W + U(L_J + U) >$. Činitel rozšíření pro normální rozdělení je $k^* = 2$. V případě jednostranného normálního rozdělení je činitel rozšíření $k^* = 1,6$. [11]

$$U = k^* \cdot \sigma_{tot} \quad (53)$$

5.3 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA σ_{omc}

Zmiňovaná směrodatná odchylka σ_{omc} je určena samostatně z četných měření podle (48) za podmínky opakovatelnosti měření, tzn., v co nejkratším časovém intervalu byl měřen stejný zdroj, za stejných pracovních podmínek, stejnou obsluhou a pomocí stejných měřicích přístrojů v téže poloze.

$$\sigma_{omc} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (L_{pj} - L_{pav})^2} \text{ dB} \quad (54)$$

kde N je počet měření. L_{pj} je hladina akustického tlaku, která je měřena v předepsané poloze. Index označuje j -té opakování měření za předepsaných podmínek provozu a kvalitního upevnění. L_{pav} je průměrná hodnota ze všech naměřených hladin akustického tlaku. Měření jsou korigována na hluk pozadí. V případě silného kolísání akustického výkonu může být dosaženo $\sigma_{omc} = 4$ dB. Příkladem mohou být drtičky kamene, kdy hluk související s činností stroje silně kolísá. V případě nepředvídatelného kolísání může hodnota nabývat $\sigma_{omc} = 2$ dB a v případě velmi malé změny akustického výkonu za správného postupu měření lze použít $\sigma_{omc} = 0,5$ dB. [5]

Hodnota směrodatné odchylky σ_{omc} je vzhledem k σ_{R0} důležitější, protože v praxi nabývá větších hodnot. Z toho plyne, že pokud platí $\sigma_{omc} > \sigma_{R0}$, pak nemá význam použít přesnější



měřicí postup, kterým bychom získali nižší σ_{R0} , protože nižší σ_{R0} nevede ke snížení celkové nejistoty měření σ_{tot} . V případě $\sigma_{omc} < \sigma_{R0}$, je třeba rozlišovat skutečnou celkovou směrodatnou odchylku σ_{tot} a směrodatnou odchylku σ_{omc} , protože aktuální mezinárodní norma stanovuje pro různé třídy přesnosti jen σ_{R0} . [5]

Tab. 2 Celková směrodatná odchylka σ_{tot} pro 3 odlišné případy. Převzato z [5]

Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti metody σ_{R0} [dB]	Podmínky provozu a upevnění		
	Stabilní	Nestabilní	Velmi nestabilní
	Směrodatná odchylka σ_{omc} [dB]		
	0,3	2	4
	Celková směrodatná odchylka σ_{tot} [dB]		
0,5	0,6	2,1	4,0

5.4 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA REPRODUKOVATELNOSTI σ_{R0}

Směrodatná odchylka σ_{R0} zahrnuje nejistotu způsobenou odlišnými vyzařovacími charakteristikami měřeného zdroje, odlišným přístrojovým vybavením a odlišným postupem měření. Tato odchylka tedy nezahrnuje nejistotu způsobenou nestabilitou akustického výkonu měřeného zdroje, protože tento vliv je zahrnut v σ_{omc} . Hodnoty, které jsou specifické pro konkrétní zdroj, je možné odvodit z mezilaboratorních porovnávacích zkoušek nebo také s pomocí matematického modelování. Mezilaboratorní porovnávací zkoušky jsou takové zkoušky, které jsou prováděny dle ISO 5725 a za podmínek reprodukovatelnosti. Podmínky reprodukovatelnosti jsou takové podmínky, které zaručují, že měření provedly odlišné osoby, na odlišných zkušebních místech a s jinými měřicími přístroji. Matematické modelování je takový přístup, který je podrobně uveden v ISO/IEC Guide 98-3:2008 a který zahrnuje několik dílčích složek nejistot, jako např. parametry nejistot přístrojů, korekce na prostředí a polohy mikrofonů. [5]

Vzhledem k rozmanitosti strojů a zařízení jsou uvedeny typické horní hranice hodnot σ_{R0} v následujících tabulkách uvedené níže. Rozdíl mezi hodnotami v tabulkách je ten, že hodnoty σ_{R0} jsou pro polobezdovukovou komoru o něco vyšší.



Tab. 3 Horní mezní hodnoty σ_{R0} pro hladiny akustického výkonu a hladiny akustické energie v bezodrazové místnosti. Převzato z [5]

Šířka frekvenčního pásma	Střední frekvence třetinooktávového pásma Hz	Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti σ_{R0} dB
Třetina oktávy	50 – 80	2,0
	100 – 630	1,0
	800 – 5000	0,5
	6300 – 10 000	1,0
	12 500 – 20 000	2,0

Tab. 4 Horní mezní hodnoty σ_{R0} pro hladiny akustického výkonu a hladiny akustické energie v polobezodrazové místnosti. Převzato z [5]

Šířka frekvenčního pásma	Střední frekvence třetinooktávového pásma Hz	Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti σ_{R0} dB
Třetina oktávy	50 – 80	2,0
	100 – 630	1,5
	800 – 5000	1,0
	6300 – 10 000	1,5
	12 500 – 20 000	2,0



6 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

6.1 MIKROFON

Mikrofon je měnič zaznamenaného kmitání plynného prostředí na elektrický signál. V hlukoměrné technice je používáno reciprokových měničů. Tyto měniče dokážou převést mechanické kmitání na elektrický signál a elektrický signál na mechanické kmitání. Používané reciprokové měniče jsou dynamický, elektrostatický, piezoelektrický. [20]

6.1.1 TYP MIKROFONU

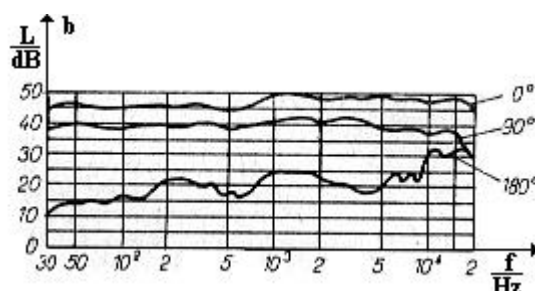
V dnešní době je nejpoužívanější elektroakustický převodník elektrostatický kondenzátorový mikrofon. Tento měnič obsahuje obvykle perforovanou pevnou elektrodu. Před touto elektrodou je pohyblivá elektroda, která tvoří membránu. Mezi elektrodami je stejnosměrné polarizační napětí. Při pohybu membrány je změněna kapacita mezi těmito elektrodami. Z toho plyne, že tento mikrofon potřebuje vysoké polarizační napětí. V praxi je to vyřešeno napáječem, který dodává požadované napětí mikrofonu a také předzesilovači. [12]

6.1.2 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA

U kondenzátorových mikrofonů je směrová charakteristika, tj. závislost citlivosti membrány mikrofonu na úhlu mezi osou mikrofonu a osou zdroje zvuku, všesměrová. Kondenzátorové mikrofony tedy vykazují stejnou citlivost na podněty přicházející z různých směrů. V oblasti vyšších kmitočtů je doporučeno použít konstrukčně menší mikrofony, protože větší mikrofony při kmitočtech nad 5 kHz ztratí všesměrovou charakteristiku a nejsou stejně citlivé na mechanické vlnění přicházející ze stran. [2]

6.1.3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Frekvenční charakteristika mikrofonu je rozsah přenášeného pásma akustických signálů. Tato charakteristika se zobrazuje za konstantního tlaku jako závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci. Doporučený interval frekvencí je mezi 40 Hz a 15 kHz. Tolerovaná nerovnoměrnost průběhu frekvenční charakteristiky je ± 5 dB. Obr. 4 ukazuje příklad frekvenční charakteristiky dynamického mikrofonu, kde nejmenší nerovnoměrnost (zvlnění) průběhu frekvenční charakteristiky je pro křivku označenou 0° , tzn. mikrofon měřen zepředu. Ostatní křivky ukazují průběh při měření mikrofonem pod úhlem. [17]



Obr. 4 Frekvenční charakteristika dynamického mikrofonu [17]

6.1.4 POUŽITÝ MIKROFON BĚHEM MĚŘENÍ

V průběhu měření je použit 4189-A-021-1/2 palcový mikrofon s předzesilovačem typu 2671 od dánského výrobce Brüel & Kjaer. Zařízení vyhovuje IEC 61672 třídy I. Tento mikrofon

s vysokou citlivostí je vhodný pro vysoce přesné měření. Technické vlastnosti mikrofonu jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Parametry použitého mikrofonu

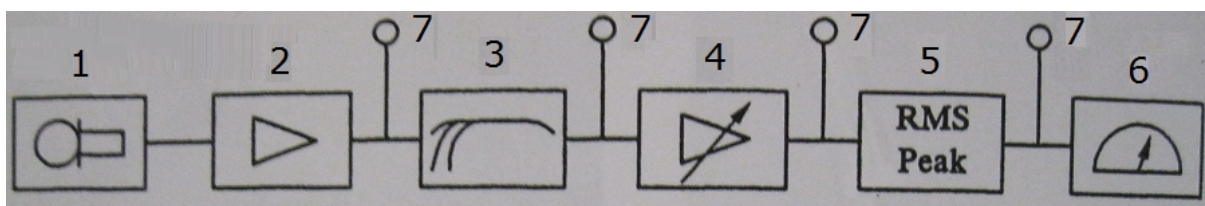
Typ mikrofonu	Elektrostatický kondenzátorový mikrofon
Citlivost	50 mV/Pa
Frekvenční rozsah	20 Hz – 20 kHz
Dynamický rozsah	16,5 – 134 dB



Obr. 5 Mikrofon 4189-A-021-1/2

6.2 ZVUKOMĚŘ

Pro měření zvuku je používán zvukoměr. Zvukoměr je nástroj, kterým je měřena hladina akustického tlaku. Běžně je tento nástroj používán ke studiím hlukového znečištění v různých odvětvích průmyslu. Blokový diagram níže ukazuje hlavní komponenty zvukoměru. [1]



Obr. 6 Blokové schéma hlavních komponentů zvukoměru [1]

1. Mikrofon
 - zajišťuje snímání kolísání akustického tlaku a konvertuje jej na analogový elektrický signál
2. Předzesilovač
 - je používán ke snížení vysoké impedance mikrofonu a někdy může poskytnout stejnosměrné polarizační napětí mikrofonu



3. Frekvenční váhový filtr
 - jsou použity při úpravě lineární charakteristiky nebo nejsou vůbec použity. V případě nedostatku váhových filtrů jsou použity především vnější filtry oktávové a třetinooktávové.
4. Regulační rozsah zesilovače
 - slouží k úpravě napětí signálu. Mnoho zvukoměrů má limitní rozsah hladin zvuku.
5. Detektor
 - je používán k charakterizaci přichozícího signálu. Existuje několik typů detektorů, které se běžně používají. Tyto detektory obsahují efekťovací obvod, který určuje výslednou efektivní hodnotu jednotlivých složek nekoherentního signálu a integrační obvody, které stanoví průměrnou hodnotu akustického tlaku v časovém rozmezí.
6. Displej
 - je používán k ukázání hodnoty hladiny, jakmile je amplituda signálu detekována. Displeje zvukoměrů jsou obvykle odstupňovány v decibelech vzhledem k mezinárodnímu standardu $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.
7. Výstupy
 - jsou nezbytné pro možnost analýzy a grafické zpracování [1]

Úprava signálu ze snímače v měřicím řetězci podléhá pravidlům. Jedná se o pravidla zmiňující frekvenční charakteristiku přenosového řetězce, způsob vyhodnocení hodnoty signálu nebo časové integrace amplitudově proměnného signálu za daný čas. Do měřicího řetězce je doporučeno vložit indikaci přebuzení, vnitřní cejchovací obvody, kontroly napájení, atd. To z toho důvodu, aby nedošlo ke znehodnocení naměřené hodnoty. Dále je potřeba zvolit vhodné vstupy a výstupy externích filtrů nebo výstupy signálového napětí pro záznam. Naměřené hodnoty jsou platné ve chvíli, kdy je zohledněna chyba měření. Vlastnosti všech zvukoměrů jsou normalizovány (ČSN IEC 651+ A1). V případě zvukoměru s označením „přesný“ je tolerováno ± 2 dB chyba měření. V případě dvou zvukoměrů s tímto označením „přesný“ by chyba měření neměla dosáhnout větší hodnoty než 4 dB. V případě zvukoměru „běžný“ ± 4 dB (8 dB). [20]

6.2.1 POUŽITÝ ZVUKOMĚR BĚHEM MĚŘENÍ

K měření byl použit zvukoměr od stejného výrobce Brüel & Kjaer. Typ 3099A-X1/2. Tento zvukoměr je ideální pro 1 - 12kanálové systémy.

6.3 POUŽITÝ KALIBRÁTOR

K měření byl použit kalibrátor od stejného výrobce Brüel & Kjaer. Typ 4230. Tento kalibrátor vydal sinusový tón o frekvenci 1000 Hz a pro kalibraci byla použita hladina akustického tlaku 94 dB.

6.4 POUŽITÝ REKORDÉR

Rekordérem byla nastavena vzorkovací frekvence, rozlišení, výběr datového formátu nahrávky, atd.

Vzorkovací frekvence	32 768 Hz
Bitová hloubka vzorkování	24 bit



7 VLASTNÍ MĚŘENÍ

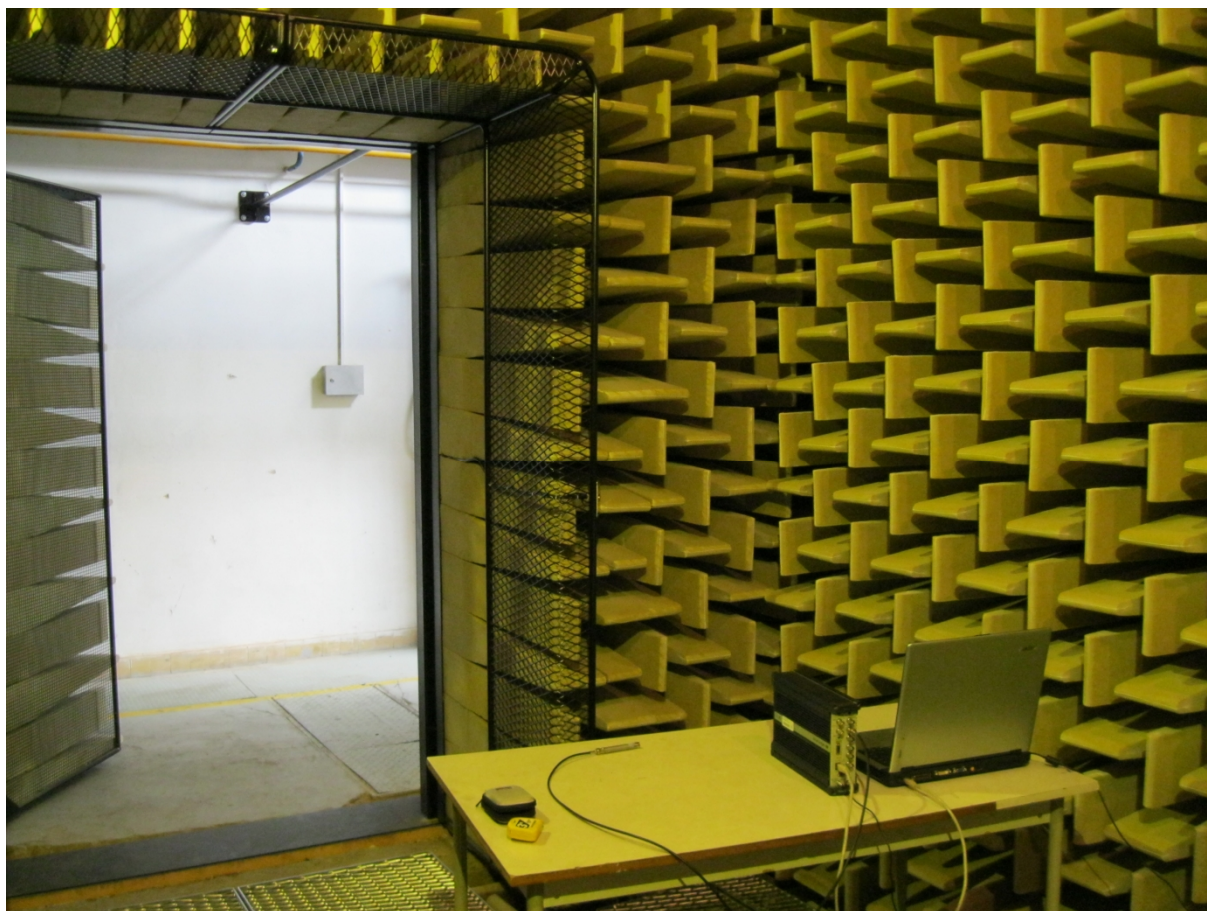
Tato kapitola obsahuje detaily o použitém zdroji zvuku, zkušební místnosti, schématu provedeního měření a postupu měření s příslušnými výpočty.

7.1 POUŽITÁ BEZDOZVUKOVÁ KOMORA

Měření akustických veličin je realizováno v plně bezdozvukové komoře patřící Ústavu automobilního a dopravního inženýrství (ÚADI) na Vysokém učení technickém v Brně. Technické parametry této místnosti jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Technické parametry bezdozvukové komory na ÚADI FSI VUT v Brně [21]

Vlastnosti místnosti splňují požadavky	ČSN EN ISO 3745
Po osazení stěn a stropu klíny [mm]	3550 x 2760 x 3600 (délka x šířka x výška)
Materiál potahu klínů (objemová hmotnost)	Orsil N (100 kg/m ³)
Frekvenční rozsah [Hz]	100 – 20 000
Hloubka obkladu zdí a stropu [mm]	865
Nosnost podlahy [kg]	>800
Hluk pozadí [dB(A)]	20
Doba dozvuku kratší než	0,1 s (100 Hz); 0,02 s (1000 Hz); 0,005 s (10 kHz)

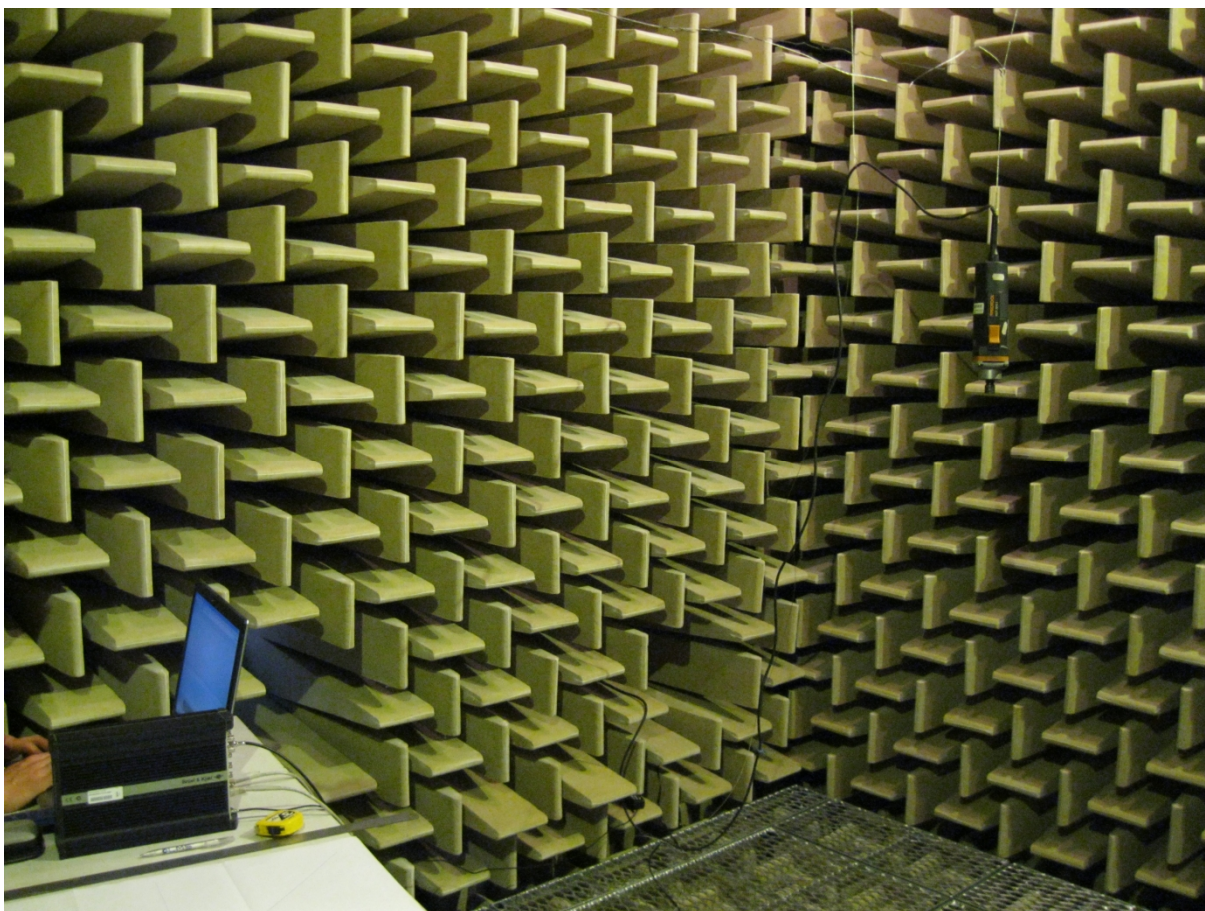


Obr. 7 Bezdozvuková komora na ÚADI VUT v Brně

7.2 POUŽITÝ ZDROJ ZVUKU

Jako zdroj zvuku je vybrána přímá bruska SGP 30-8 E od výrobce Protool, která má následující technické parametry.

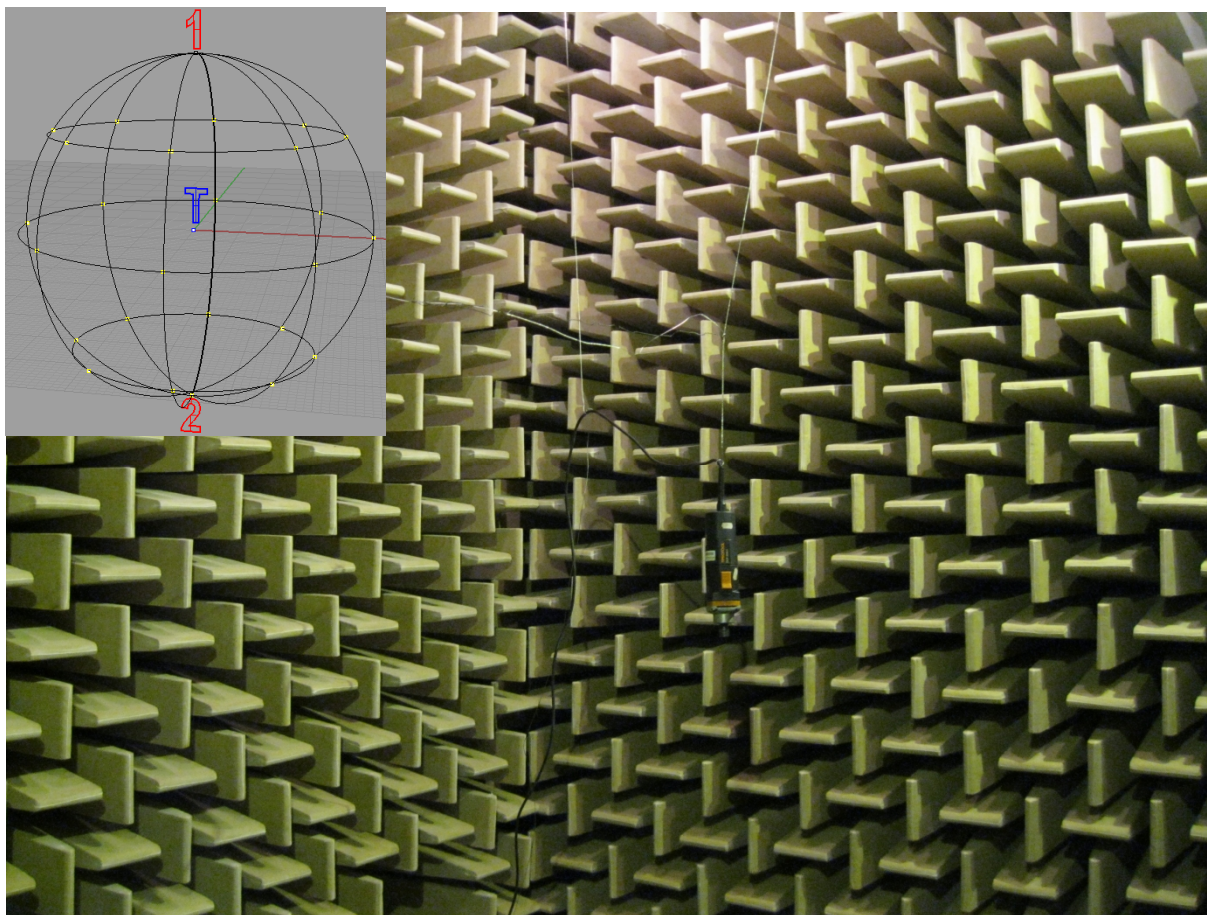
Rozměry zdroje zvuku	Upraveny do podoby hmotného bodu, který je v těžišti měřené brusky
Jmenovité napětí [V]	230
Jmenovitý příkon [W]	740
Jmenovité otáčky [ot./min]	13 – 31 000
Hmotnost [kg]	1,5



Obr. 8 Zavěšení přímé brusky SGP 30-8 E

7.3 POSTUP PŘI MĚŘENÍ

Mikrofon je umístěn libovolně v prostoru uzavřené místnosti, aby byla pořízena nahrávka pozadí místnosti. Při vyhodnocení hluku samotného zdroje zvuku je naměřená hodnota aktivního zdroje zvuku ponížena o hodnotu hluku okolí. V našem případě je naměřená hodnota pouze informativní. Dalším krokem je vhodné umístění měřicího zařízení od zdroje zvuku s ohledem na Fresnelovo pole. Dále ve vzdálenosti 50 mm od těžiště zdroje zvuku jsou vytvořeny body, pro které jsou postupně pořízeny nahrávky aktivního zdroje zvuku. Schéma pozic mikrofону je upřesněno na Obr. 9.



Obr. 9 Schéma pořizování nahrávek

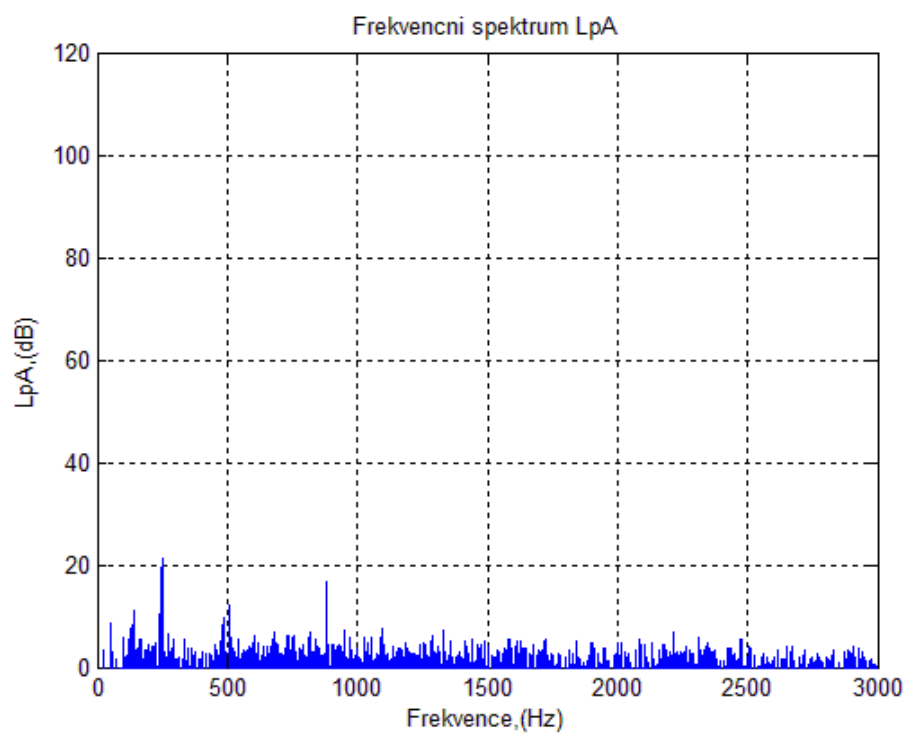
7.4 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU V PROSTŘEDÍ MATLAB

Pro zpracování zvukových signálů je použito programovací prostředí MATLAB. [27] Zvukové signály jsou zpracovány algoritmem uloženým na přiloženém datovém nosiči. Zvolený postup vede k výpočtu a k následnému vykreslení konečné hladiny akustického tlaku tak, jak jí vnímá lidský sluch.

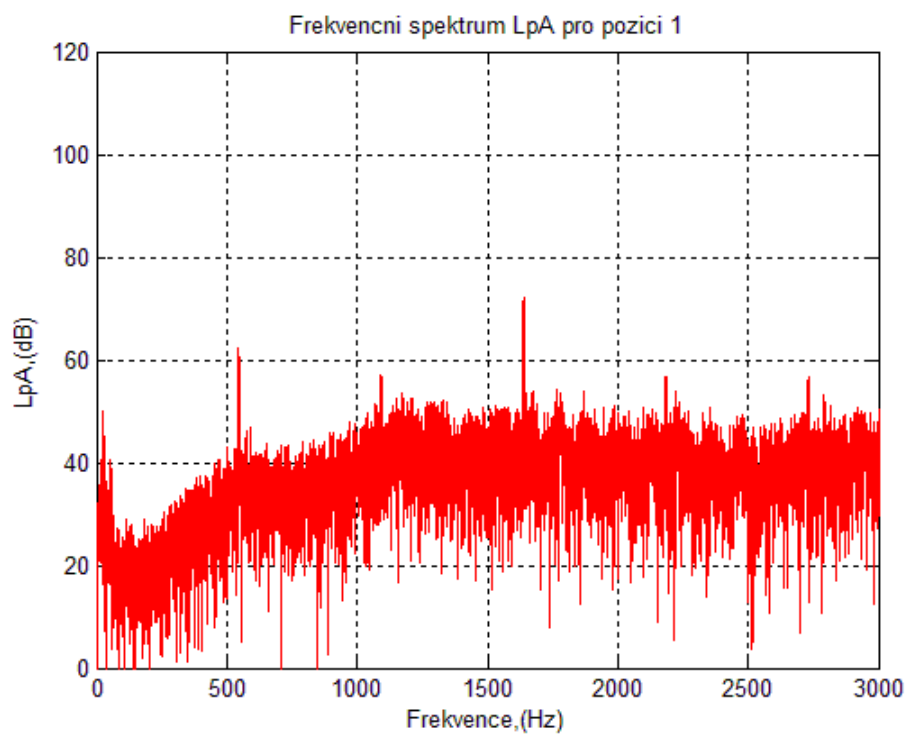
Během výpočtu jsou importována data se zaznamenaným signálem s danou vzorkovací frekvencí a bitovou hloubkou vzorkování. Dále je proveden výběr intervalu zkoumané oblasti signálu. Upravené záznamy jsou podrobeny frekvenční analýze za použití rychlé Fourierově transformaci pro rozdělení signálu na jednotlivá pásma. Dále je použito Hanningovo (Hannovo) okno, které je v praxi často používáno, protože dokáže vybrat jednotlivé úseky a předejít tak chybám při aplikaci FFT na periodické signály. [8] Důvodem použití váhového filtru je úprava hladiny zvuku, a to z důvodu zkreslené citlivosti lidského sluchu při různých kmitočtech. [24]



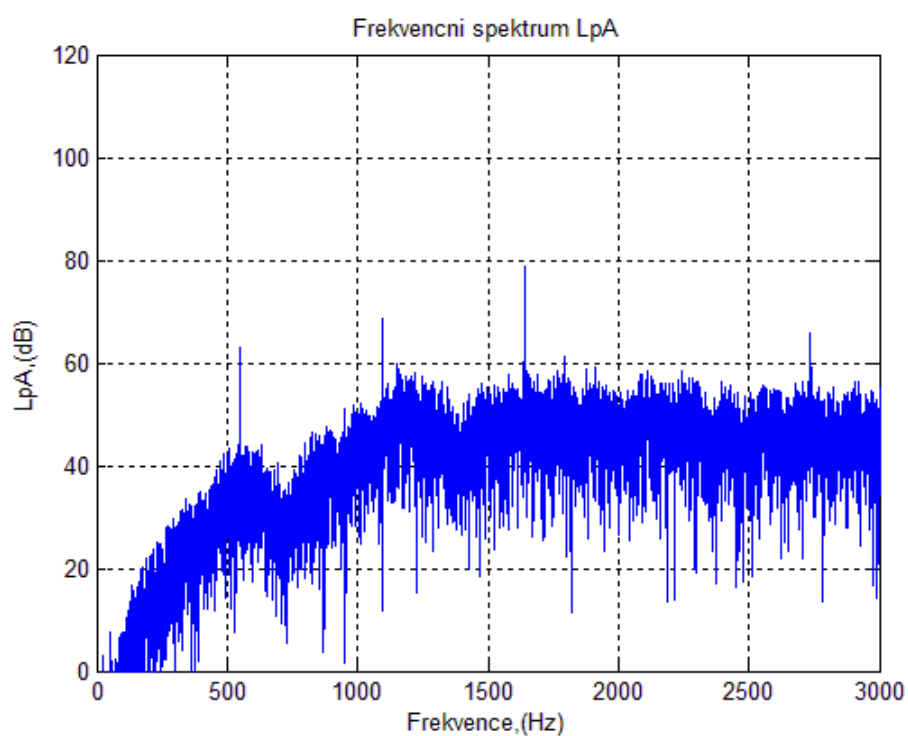
7.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ



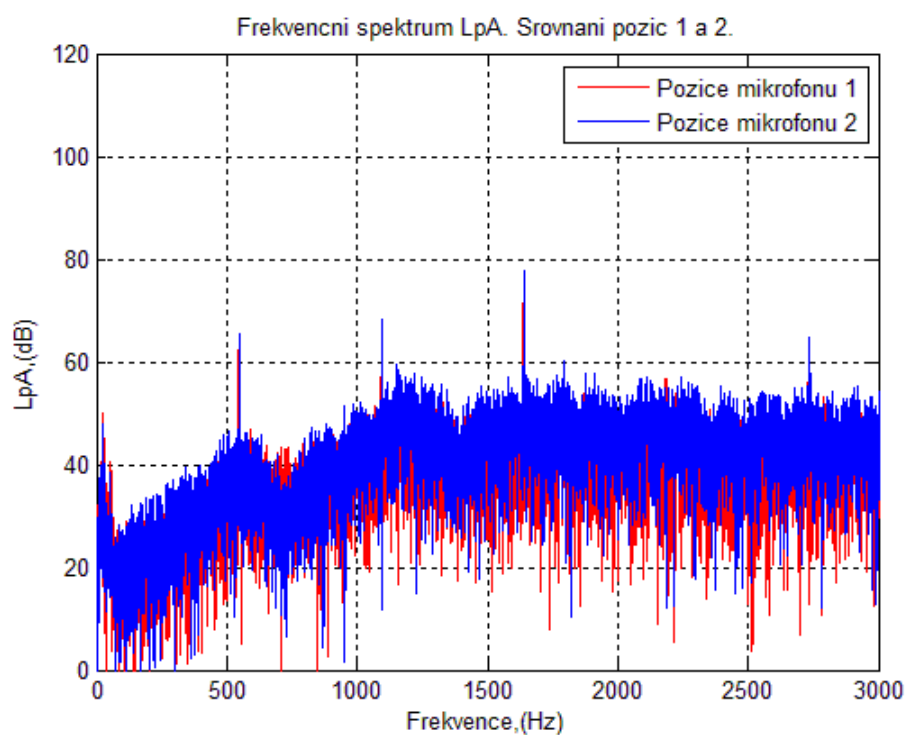
Obr. 10 Hluk pozadí



Obr. 11 Pozice 1



Obr. 12 Pozice 2



Obr. 13 Porovnání hodnot z jednotlivých pozic



ZÁVĚR

V úvodu této práce je představena základní část akustických veličin. Především je věnována pozornost nejčastěji měřeným akustickým veličinám. Dále se práce zabývá vlastnostmi, oblastmi použití a historií bezdozvukových komor. Další kapitoly podrobně popisují fyzikální požadavky na vlastnosti těchto komor respektující požadavky ČSN EN ISO 3745. Další část práce je věnována nejistotám měření v souladu s mezinárodní normou. V kapitole před vlastním měřením je pojednáno o měřicích přístrojích a jejich charakteristikách. V neposlední části jsou představeny technické parametry měřicích přístrojů použitých během vlastního měření.

V poslední (experimentální) části této závěrečné práce bylo uskutečněno měření v plně bezdozvukové komoře na ÚADI VUT v Brně. Před začátkem měření byl navržen zvukový řetězec, který obsahoval kondenzátorový mikrofón, zvukoměr s kalibrátorem, předzesilovač a zvukovou kartu. Základem měření se tedy stal kondenzátorový mikrofón, který pracuje na principu převedení tlaku zvukové vlny na elektrický signál. Dále byl vybrán zdroj zvuku a umístěn do prostoru komory tak, aby bylo možné v dostatečné vzdálenosti od těžiště tohoto zdroje provést měření ve vybraných bodech. V každém bodě byl pořízen vektorový zápis signálu, který byl postupně zpracováván v prostředí MATLAB. Analogový signál byl navzorkován s danou frekvencí a daným počtem bitů na vzorek. Při součinu těchto dvou čísel byla získána přenosová rychlost digitálního signálu. Vzniklý signál byl tedy složen z pulzů a nabývá nekonečně mnoha hodnot. Tyto hodnoty bylo nutné zaokrouhlit, čímž vznikla chyba závislá na počtu bitů na vzorek. Proto se použila rychlá Fourierova transformace pro rozdělení signálu na jednotlivá pásma. Dále bylo v programu použito Hanningovo časové okno k potlačení nepravé frekvence.

Z výsledků měření je patrné, že zdroj zvuku v oblasti pozice 1 vykazuje nižší hodnoty hladiny akustického tlaku, než protilehlé body v oblasti pozice 2. Důvodem je umístění převodovky, která je blíže k oblasti pozice 2. Cílem této experimentální části bylo stanovit hladinu akustického tlaku v referenčních bodech s ohledem na příslušný váhový filtr A.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BELL, Lewis H. *Industrial noise control: fundamentals and applications*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 1994, xiv, 660 s. Mechanical engineering. ISBN 08-247-9028-6.
- [2] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 202 s. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [3] BERANEK, L.L., SLEEPER, H.P., The Design and Construction of Anechoic Sound Chambers, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 18, 1946, 140-156 s.
- [4] BIES, David A. *Engineering noise control: theory and practice*. 2nd ed. London: E, 1996, xvi, 615 s. ISBN 04-192-0430-X.
- [5] ČSN EN ISO 3745. *Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [6] DAVIES, R.S. Equation for the determination of the density of moist air. *Metrologia*. 1992, 29, pp. 67-70
- [7] HAVELOCK, David Ian, Sonoko KUWANO a Michael VORLÄNDER. *Handbook of signal processing in acoustics*. New York, NY: Springer, c2008, 2 v. (xxv, 1950 p.). ISBN 9780387304410-.
- [8] HEINZEL, G., RÜDIGER, T., SCHILLING, R. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows. Hannover, 2002, s. 84. Dostupné z: <http://edoc.mpg.de/get.epl?fid=55356&did=395068&ver=0>
- [9] HÜBNER, G. Accuracy consideration on the meteorological correction for a normalized sound power level. In: *Proceeding Inter-Noise 2000*, Nice, France, INCE Conference Proceedings, 2000-08-27, 204, pp. 1907-1912
- [10] JOPPA, P.D., SUTHERLAND, L.C., ZUCKERWAR, A.J. Representative frequency approach to the effect of band pass filters on evaluation of sound attenuation by the atmosphere. *Noise Control Eng.* 1996, 44, pp. 261-273
- [11] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 3. dopl. vyd. Brno: CERM, 2007, 170 s. ISBN 978-80-214-3380-9.
- [12] Konstrukce mikrofónů. *Elektroakustika* [online]. 2014 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html
- [13] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*, Brno: FSI VUT v Brně a PC-DIR, s.r.o., 1998. 177s. ISBN: 80-214-1262-3.
- [14] National Industries [online]. [cit. 2014-02-07]. Acoustic Test Chambers and Environments. Dostupné z: <http://www.ni.com>



- [15] Noise Measurement Terms Part 3. *Environmental Noise Measurement Instruments* [online]. 2012 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.cirrus-environmental.com>
- [16] RAIDA, Z. a kolektiv. Elektromagnetické vlny, mikrovlnná technika. *Multimediální učebnice*. [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=A-5>
- [17] REICHL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006, poslední aktualizace 9. 12. 2011 [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [18] SABINE, H.J., Notes on Acoustic Impedence Measurements, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 14, 1942, 143-150 s.
- [19] SALAVA, Tomáš. *Elektroakustická a elektromechanická měření*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 298 s.
- [20] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [21] Technická zpráva o realizaci bezodrazové místnosti na ÚADI FSI VUT v Brně, VŠB-TU Ostrava, 2014, Zpráva o popisu technického řešení - nepublikovaná práce
- [22] The Audio Chambers of DTU, Denmark. *Alastairphilipwiper* [online]. 2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://alastairphilipwiper.com/blog/audio-chambers-dtu/>
- [23] TITZE Ingo R., POPOLO Peter S. and ŠVEC Jan G., Measurement of vocal doses in speech: experimental procedure and signal processing. *Logopedics Phoniatrics Vocology* [online]. 2003, Vol. 28, Issue 4, s. 181-192 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz>
- [24] Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB ve Zlíně. *Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma* [online]. 2010 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [25] Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB ve Zlíně. *Pohlcování zvuku, šíření hluku ve volném a uzavřeném prostoru* [online]. 2010 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_04.pdf
- [26] WURMAN, P.R. Anechoic Chamber Design and Acoustical Analysis of Room 1-051, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, *Thesis (B.S.)*, 1987, 102 s.
- [27] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB pro začátečníky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 143 s. ISBN 80-7300-095-4.



SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\overline{L_E}$	[dB]	Hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU
$\overline{L_p}$	[dB]	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše
ΔL_{pi}	[dB]	Změna hladin průměrovaného ak. tlaku v třetinooktávovém pásmu
A_0	[-]	Číselná hodnota součinitele útlumu
$\dot{L}_{Ei,q(ST)}$	[dB]	Hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU
$\dot{L}_{Ei(ST)}$	[dB]	Střední hladina časově integrovaného ak. tlaku JZU pro 1 událost
$L_{W,j}$	[dB]	Hladina akustického výkonu v j-tém třetinooktávovém pásmu
$L_{pi(B)}$	[dB]	Hladina průměrovaného ak. tlaku (B) v třetinooktávovém pásmu
$L_{pi(ST)}$	[dB]	Hladina průměrovaného akustického tlaku korigovaná na hluk pozadí
$\dot{L}_{pi(ST)}$	[dB]	Hladina průměrovaného ak. tlaku v třetinooktávovém pásmu
N_e	[-]	Počet měření jednotlivých emisních zvukových událostí
j_{max}	[-]	Hodnota odpovídající nejvyššímu třetinooktávovému pásmu měření
j_{min}	[-]	Hodnota odpovídající nejnižšímu třetinooktávovému pásmu měření
k^*	[-]	Činitel rozšíření
\vec{n}	[m·s ⁻¹]	Normálový vektor plochy
$\theta_{0,1}$	[K]	Teplota, kdy je statický tlak roven tlaku statickému referenčnímu
θ_{met}	[°C]	Teplota vzduchu za rozdílných meteorologických podmínek
σ_{R0}	[dB]	Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti metody
σ_{omc}	[dB]	Směrodatná odchylka vzniklá nestabilitou podmínek provozu
σ_{tot}	[dB]	Celková směrodatná odchylka
$\propto (f)$	[-]	Součinitel útlumu
A	[m ²]	Celková pohltivost přijímací místnosti
c	[m·s ⁻¹]	Rychlost zvuku v daném prostředí
C_1	[dB]	Korekce na referenční veličiny
C_2	[dB]	Korekce na akustickou vyzařovací impedanci
C_3	[dB]	Korekce na pohltivost vzduchu na specifických frekvencích
C_j	[-]	Tabulková hodnota pro výpočet hladiny akustického výkonu
D	[-]	Stupeň zvukové izolace
D_{Ji}	[-]	Index směrovosti
E_0	[N·m ⁻²]	Referenční hodnota
I	[W·m ⁻²]	Akustická intenzita
I_0	[W·m ⁻²]	Akustická intenzita původní



I_1	[W·m ⁻²]	Akustická intenzita v prvním prostředí
I_2	[W·m ⁻²]	Akustická intenzita ve druhém prostředí
I_t	[W·m ⁻²]	Akustická intenzita transferovaná
J	[J]	Akustická energie
J_0	[J]	Referenční hodnota akustické energie
k	[-]	Index po sobě jdoucích nahrávek
K	[s]	Celková délka nahrávek
K_1	[dB]	Korekce na hluk pozadí
L_1	[dB]	Hladina intenzity zvuku v první místnosti
L_2	[dB]	Hladina intenzity zvuku ve druhé místnosti
L_E	[dB]	Hladina časově integrovaného akustického tlaku JZU
L_J	[dB]	Hladina akustické energie
L_p	[dB]	Hladina akustického tlaku
$L_{p,T}$	[dB]	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku
L_{p1}	[dB]	Hladina akustického tlaku ve vysílací místnosti
L_{p2}	[dB]	Hladina akustického tlaku v přijímací místnosti
L_{pav}	[dB]	Aritmetický průměr hladin akustického tlaku
L_W	[dB]	Hladina akustického výkonu
L_{Wmet}	[dB]	Hladina ak. výkonu za rozdílných meteorologických podmínek
N	[-]	Počet měření
N_M	[-]	Počet poloh mikrofonů nebo drah posuvu
p	[Pa]	Akustický tlak
P	[W]	Akustický výkon
p_0	[Pa]	Referenční akustický tlak
$p_{0,S}$	[kPa]	Referenční statický tlak
$P_{s,met}$	[kPa]	Statický tlak za rozdílných meteorologických podmínek
S	[m ²]	Plošný obsah
S_0	[m ²]	Referenční plošný obsah polokulové měřicí plochy
S_1	[m ²]	Plošný obsah kulové měřicí plochy
S_2	[m ²]	Plošný obsah polokulové měřicí plochy
t	[s]	Čas
T	[s]	Časový interval měření
T_0	[s]	Referenční hodnota časového intervalu měření



t_1	[s]	Iniciální čas měření
t_2	[s]	Finální čas měření
U	[dB]	Rozšířená nejistota měření
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost kmitajících částic
V_I	[-]	Index nerovnoměrnosti hladiny měřených hladin akustického tlaku
W_d	[J]	Energie dopadající
W_p	[J]	Energie pohlcená
α	[-]	Činitel pohltivosti
θ	[K]	Teplota vzduchu v době a místě zkoušky
ρ	[kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost
ρ_c	[kg·m ⁻³]	Měrná hmotnost vzduchu
τ	[-]	Koeficient zvukové průzvučnosti
Φ	[°]	Úhel dopadu vlny
ω	[Hz]	Frekvence
$u(L_J)$	[dB]	Nejistota hladin akustické energie
$u(L_W)$	[dB]	Nejistota hladin akustického výkonu
L_{pmax}	[dB]	Nejvyšší hodnota naměřené hladiny akustického tlaku
L_{pmin}	[dB]	Nejnižší hodnota naměřené hladiny akustického tlaku
n_M	[-]	Počet poloh mikrofonu
c_{vzduch}	[m·s ⁻¹]	Rychlost šíření rozruchu ve vzduchu
$L_{p\vartheta}$	[dB]	Hladina ak. tlaku měřená při r a ϑ od zdroje vyzařující výkon W
L_{ps}	[dB]	Hladina ak. tlaku měřená při r a nesměrového zdroje vyzařující výkon W
JZU		Jednotlivé zvukové události
RMS		Odmocnina střední hodnoty kvadrátu (Root Mean Square)
DTU		Denmark's Technical University
FFT		Fast Fourier Transformation



SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1 LONGITUDINÁLNÍ VLNĚNÍ (HORNÍ) A TRANSVERZÁLNÍ VLNĚNÍ [26]	13
OBR. 2 POHLED DO PLNĚ BEZDOZVUKOVÉ KOMORY NA DTU V DÁNSKU [22]	20
OBR. 3 HODNOTY Činitele zvukové pohltivosti různých materiálů [25]	23
OBR. 4 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA DYNAMICKÉHO MIKROFONU [17]	37
OBR. 5 MIKROFON 4189-A-021-1/2	38
OBR. 6 BLOKOVÉ SCHÉMA HLAVNÍCH KOMPONENTŮ ZVUKOMĚRU [1]	38
OBR. 7 BEZDOZVUKOVÁ KOMORA NA ÚADI VUT V BRNĚ	41
OBR. 8 ZAVĚŠENÍ PŘÍMÉ BRUSKY SGP 30-8 E	42
OBR. 9 SCHÉMA POŘIZOVÁNÍ NAHRÁVEK	43
OBR. 10 HLUK POZADÍ	44
OBR. 11 POZICE 1	44
OBR. 12 POZICE 2	45
OBR. 13 POROVNÁNÍ HODNOT Z JEDNOTLIVÝCH POZIC	45



SEZNAM TABULEK

TAB. 1 REFERENČNÍ METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY [5].....	27
TAB. 2 CELKOVÁ SMĚRODATNÁ ODCHYLKA σ_{tot} PRO 3 ODLIŠNÉ PŘÍPADY. PŘEVZATO Z [5]..	35
TAB. 3 HORNÍ MEZNÍ HODNOTY $\sigma R0$ PRO HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU A HLADINY AKUSTICKÉ ENERGIE V BEZODRAZOVÉ MÍSTNOSTI. PŘEVZATO Z [5]	36
TAB. 4 HORNÍ MEZNÍ HODNOTY $\sigma R0$ PRO HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU A HLADINY AKUSTICKÉ ENERGIE V POLOBEZODRAZOVÉ MÍSTNOSTI. PŘEVZATO Z [5]	36
TAB. 5 PARAMETRY POUŽITÉHO MIKROFONU	38
TAB. 6 TECHNICKÉ PARAMETRY BEZDOZVUKOVÉ KOMORY NA ÚADI FSI VUT V BRNĚ [21]..	40



SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého DVD

55



A OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

Na přiloženém datovém nosiči jsou nahrány:

- zaverena_prace.pdf
- MATLAB_zdrojovy_kod.txt
- jednotlivé zvukové signály:
 - pozadi.mat
 - 1.mat
 - 2.mat